

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

139
24°

FACULTAD DE QUIMICA

TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA

ALCOHOLERA A PARTIR DE MELAZAS DE CAÑA DE AZUCAR

TRABAJO MONOGRAFICO DE ACTUALIZACION

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

QUIMICO FARMACEUTICO BIOLOGO

PRESENTA:

ALEJANDRO HECTOR ZAMANO PEREZ

MEXICO D.F. 1991

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

	Pág.
1. <u>INTRODUCCION</u>	1
2. <u>PROBLEMATICA MUNDIAL</u>	6
2.1. <u>Proceso de producción de azúcar</u>	11
2.1.1. Lavado y reducción de tamaño	11
2.1.2. Extracción de jugo	12
2.1.3. Clarificación	13
2.1.4. Evaporación y cristalización	14
2.1.5. Centrifugado	15
2.1.6. Secado y envasado	16
2.2. <u>Proceso de fabricación de alcohol etílico</u>	18
2.2.1. Preparación del mosto y fermentación	19
2.2.2. Destilación	20
2.3. <u>Efluentes en la industria azucarera</u>	24
2.3.1. Aguas crudas o de suministro	28
2.3.2. Aguas de condensados y residuales	28
2.3.3. Aguas residuales	29
2.3.4. Vinazas	35
2.4. <u>Tratamiento de los efluentes líquidos</u>	36
2.4.1. Tratamiento preliminar	37

2.4.2.	Tratamiento primario	37
2.4.3.	Tratamiento secundario (Biológico)	38
2.4.4.	Tratamiento terciario (Físicoquímico)	38
3.	<u>PROCESOS DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO</u>	40
3.1.	<u>Sistemas floculados aerobios</u>	43
3.1.1.	Lodos activados	43
3.1.2.	Lagunas de oxidación	45
3.2.	<u>Sistemas de película biológica aerobia</u>	45
3.2.1.	Sistemas de medio fijo	46
3.2.1.1.	El "filtro percolador" ó reactor empacado	47
3.2.2.	Sistemas de medios en movimiento	49
3.2.2.1.	Sistema de lecho fluidificado (fluidizado)	49
3.2.2.2.	Reactor biológico rotatorio	51
3.3.	<u>Tratamiento anaerobio floculado</u>	53
3.3.1.	Tratamiento anaerobio floculado clásico (digestión)	53
3.4.	<u>Diferentes modelos de biodigestores</u>	54
3.4.1.	Digestores de lote	55
3.4.2.	Digestores de régimen continuo	55
3.4.2.1.	Procedimiento por contacto	57
3.4.2.2.	El "filtro" o reactor anaerobio empacado	59

3.4.2.3.	Reactor de lecho fluidificado (fluidizado)	60
3.4.2.4.	Lecho de lodos de flujo anaerobio ascendente	61
4.	<u>PROBLEMATICA Y ALTERNATIVAS DE SOLUCION PARA MEXICO CASO TIPO VINAZAS</u>	64
4.1.	<u>Aprovechamiento de efluentes</u>	67
4.2.	<u>Tratamiento biológico de vinazas</u>	67
4.2.1.	Caracterización de las vinazas	73
4.2.2.	Equipo	74
4.2.2.1.	Reactor aerobio de biodiscos de 3000 litros	74
4.2.2.2.	Reactor de lecho fluidificado (fluidizado)	75
4.2.2.3.	Reactores de lecho empacado	76
4.2.2.4.	Reactor de manto de lodos piloto	77
4.2.2.4.1.	Reactor de manto de lodos a escala de banco	77
4.2.3.	Resultados y discusión	78
4.2.3.1.	Reactor aerobio de biodiscos	79
4.2.3.1.1.	Caracterización de la biomasa	80
4.2.3.2.	Reactor de lecho fluidificado (fluidizado)	83
4.2.3.3.	Reactor de lecho empacado (LE) y manto de lodos (ML)	85
5.	<u>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	88
6.	<u>BIBLIOGRAFIA</u>	90

LISTA DE TABLAS

No Tabla		Pág
2.1	Composición de la melaza.	18
2.2.	Aguas residuales, desechos y emisiones en un ingenio azucarero.	25
2.3.	Dispositivos para el control de la contaminación en la industria azucarera.	26
2.4.	Componentes rechazables de las aguas residuales industriales, sus consecuencias y sus orígenes típicos.	30
2.5.	Caracterización promedio del agua residual proveniente de la fabricación de azúcar mascabado.	31
2.6.	Caracterización promedio del agua residual proveniente de la fabricación de azúcar estándar.	32
2.7.	Caracterización promedio del agua residual proveniente de la fabricación de azúcar refinado.	33
2.8.	Composición de la vinaza en función de la naturaleza del mosto.	35
4.1.	Cuencas de primer orden.	68
4.2.	Características del reactor de discos rotatorio	74
4.3.	Análisis de vinazas (lotes frescos, almacenadas y diluídas	78
4.4.	Análisis promedio de las vinazas después del tratamiento en un reactor de biodiscos.	80

4.5.	Análisis proximal de la biomasa del RBR y aminograma de su proteína.	81
4.6.	Contenido de metales en vinaza y biomasa del RBR, en mg/L.	82
4.7.	Resultados obtenidos del tratamiento de lecho fluidificado (fluidizado, LF) a régimen pseudopermanente.	84
4.8.	Resultados promedio de la operación de los tres reactores empacados y de manto de lodos con un tiempo de residencia de 2.5 días, una carga orgánica de 36 kg DQO/m ³ d y a una temp. de 28°C.	86

LISTA DE FIGURAS

No Figura.	Pág.
2.1. Diagrama de proceso de elaboración de azúcar.	17
2.2. Diagrama del proceso de elaboración de alcohol etílico.	22
2.3. Diagrama simplificado de producción simultánea de azúcar, alcohol, miel invertida (HTM) y de subproductos.	23
3.1. Características esenciales de los procesos de lodos activados.	44
3.2. Sistema de biopelícula.	46
3.3. "Percolador" convencional.	48
3.4. Esquema de un reactor de lecho fluidificado.	50
3.5. Reactor biológico rotatorio	52
3.6. Digestor por contacto.	57
3.7. Digestor por contacto en dos etapas.	58
3.8. Filtro anaerobio de flujo ascendente.	59
3.9. Reactor de lecho fluidificado.	61
3.10. Lecho de flujo anaerobio ascendente de lodos.	63
4.1. Distribución regional de producción de caña de azúcar.	65
4.2. Diagrama del proceso de tratamiento biológico de vinazas.	72

1. INTRODUCCION

El hombre desde que existe ha contribuido a la transformación y el deterioro de su "hábitat" en la medida que los grupos humanos se han desarrollado y que la vida en sociedad se ha hecho más complicada y en que los adelantos de la ciencia y de la técnica han dado lugar a un creciente desarrollo urbano e industrial.

La acumulación de contaminantes ha alcanzado límites no antes superados y, por ello, se advierte el peligro de daños irreversibles que de no evitarse, seguramente dislocarán el orden social y pondrán en peligro la supervivencia de la humanidad.

La economía y la crisis energética son puntos claves para la búsqueda de alternativas que lleven a encontrar soluciones para el control de la contaminación ambiental. Afortunadamente, todos los países del planeta responden con interés; se producen leyes, normas, programas y se promueven recursos en esta significativa lucha, que no permite treguas ni plazos. En los últimos años, se ha observado un claro aumento no sólo en los conocimientos, sino también en la concientización; se han encontrado soluciones que sería más preciso denominar parciales, para enfrentar algunos problemas ambientales, para hacer una mejor gestión o manejo del medio ambiente, particularmente de aquellos ecosistemas más propios de los países en desarrollo y ausentes, en general, en el hemisferio norte, que es donde se ha desarrollado la más importante tecnología. Sin embargo, el tercer mundo aún carece en muchos sentidos de la tecnología más apropiada para la explotación

de los recursos naturales. No sólo existe el problema de la contaminación, sino también el agotamiento eventual de algunos recursos naturales renovables, justamente por la forma de su utilización y explotación que los convierte o amenaza convertirlos en no renovables.

La agroindustria azucarera es una de las cinco más contaminantes de las cuencas acuíferas del país.

Para la producción de azúcar y alcohol de caña se requiere la utilización de enormes cantidades de agua, que superan el millón de metros cúbicos por día. En la fabricación de azúcar se desechan las aguas que provienen del lavado de caña, de la clarificación de jugo, de la limpieza de evaporadores, calentadores y purgas de caldera, de enfriamiento y de servicios sanitarios, y en la fábrica de alcohol, las aguas de enfriamiento de condensadores y tinas de fermentadores y las vinazas o residuos de las torres de destilación.

De todas las aguas mencionadas, las que son más contaminantes son las vinazas, que provienen de la destilación del alcohol y que se producen en una proporción de 12 a 15 litros por cada litro de alcohol destilado.

Para disminuir este grave problema de contaminación que producen estos efluentes, en los últimos años, se ha buscado establecer una biotecnología de tratamiento que permita cumplir con las normas técnicas ecológicas vigentes.

En 1986, se planteó en México un proyecto de investigación que contempla el tratamiento de los efluentes líquidos de un

ingenio azucarero, empleando como caso tipo las aguas residuales generadas por las plantas productoras de alcohol, conocidas como vinazas, por medio de métodos aerobios y anaerobios.

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 Cinvestav-IPN a través de su Departamento de Biotecnología y Bioingeniería y el Centro de Investigación y Estudios de Posgrado de la UASLP. Este proyecto está financiado totalmente por Azúcar, S.A. (empresa paraestatal que se encarga de la distribución y comercialización del azúcar) y las propias instituciones de educación superior e investigación y han venido trabajando durante los últimos tres años en la caracterización de las vinazas y en su tratamiento anaerobio para generar biogás como un combustible secundario y aerobio para producir biomasa microbiana susceptible de ser utilizada para alimentos balanceados en animales.

Los objetivos de este proyecto global son los siguientes:

- Establecer uno o varios arreglos de los sistemas de tratamiento que permitan purificar las aguas de desecho con el costo mínimo.

- Estudiar la instrumentación real del o de los arreglos que permitan su construcción, arranque y operación con los medios disponibles.

- Desarrollar modelos cinéticos con pruebas a nivel de

laboratorio que simulen el comportamiento de las biocomunidades que proliferan en cada uno de los sistemas de tratamiento que se establezcan, para escalar los resultados obtenidos a nivel piloto, a escala prototipo y, potencialmente, a nivel industrial.

En la fase experimental a nivel piloto, se pretende alcanzar:

-Producción de biomasa microbiana cuyo contenido de proteína permita usarla como complemento nutricional en dietas de animales mono y poligátricos.

-Obtención de energía alternativa, empleando cultivos anaerobios productores de gas metano que puede ser usado como combustible limpio en los propios ingenios o en la comunidades aledañas.

-Generación de aguas tratadas menos contaminates que puedan ser arrojadas a los cuerpos acuiferos circunvecinos o ser empleadas como aguas de riego en zonas agrícolas cercanas a los ingenios.

La importancia de este proyecto radica en su contribución desde el punto de vista tecnológico y de protección ambiental (23, 70).

Se encuentra en su fase final de experimentación, la cual terminará en 1991.

Las alternativas más deseables son la utilización de parte de estos efluentes líquidos, una vez tratados por procesos biológicos para reducir de manera sustancial el consumo de agua y, consecuentemente, reducir la contaminación provocada por estos efluentes.

Dentro del proyecto se requirió realizar una revisión documental sobre los procesos que a nivel mundial, han resultado exitosos para tratar estos efluentes.

En esta tesis se recopila toda la información recabada y además se describen los avances obtenidos en el proyecto

2. PROBLEMATICA MUNDIAL

En el siglo XVI el azúcar era ya un producto de gran importancia en el comercio entre los territorios de América y Europa. En la primera década del siglo XIX, Napoleón promovió la industria del azúcar de remolacha en Europa, con el objetivo de contrarrestar los efectos del bloqueo de la flota inglesa, que prácticamente impedía el arribo de buques con azúcar procedentes de América. Al cesar la guerra y perder su valor estratégico, esta industria languideció de manera temporal para, con posterioridad, adquirir gran fuerza hasta llegar a predominar en la producción mundial.

La producción de azúcar en el mundo es de poco más de 100 millones de toneladas anuales. De este volumen total el 60% aproximadamente se obtiene de la caña de azúcar en 110 países de todos los continentes, situados en su mayoría entre los trópicos de Cáncer y Capricornio, es decir en las zonas tropicales y ecuatorial. También, se produce azúcar de caña en latitudes aledañas de estas regiones, como Andalucía, España y las llamadas llanuras norteñas de Uruguay (29,30,31).

Una consecuencia de lo anterior es que dado que este insumo se consume en todo el mundo y los países de clima templado y frío no logran ser autosuficientes, existe una importación neta de azúcar de las zonas tropicales hacia los templados y fríos. En general, los países productores de caña de azúcar tienen economías débiles por lo que se clasifican como subdesarrollados y para

alguno de ellos, este cultivo representa su principal medio de subsistencia.

El azúcar se ha caracterizado internacionalmente por una alta inestabilidad en sus precios. Así lo indican los valores registrados; por ejemplo, en 1968 alcanzó 1.5 centavos de libra y en 1974, seis años después, se cotizó alrededor de 60 centavos. Mientras tanto los costos de producción para casi todos los productores, ya sea de caña o de remolacha, se mantiene generalmente por encima del precio, lo cual obliga a la mayoría de los gobiernos a aplicar diferentes políticas proteccionistas que han tenido su expresión más negativa para el mercado azucarero en las medidas instrumentadas desde hace varios años por la Comunidad Económica Europea y los Estados Unidos de Norteamérica (13).

Esta situación ha influido para que el ritmo de crecimiento de la producción azucarera, que hasta los años 50 había alcanzado un índice del 5% anual, declinara y hoy se mantenga alrededor del 2% anual. A partir de la década de 1970 el consumo per cápita se mantiene estático, a nivel de 20 kg.

Al tiempo que la tasa de crecimiento del consumo de azúcar se ha mantenido en un poco más del 2% en los países desarrollados, los países subdesarrollados han alcanzado el 5%. Esto se aprecia en el hecho de que 20 años atrás los países subdesarrollados eran responsables del consumo del 40% del azúcar que se producía y en la actualidad alcanzan el 52%. Este aumento no ha sido a expensas del incremento de las producciones nacionales, sino de acudir cada vez más al mercado internacional para adquirir el azúcar adicional

que necesitan. Esto ha traído como consecuencia que los países con menor desarrollo, que a comienzos de la década de 1980 tenían una participación en las exportaciones del 65%, haya disminuido 8 años después al 55% (30).

A todos estos cambios en el mercado internacional, debe sumársele la tendencia, cada vez más marcada, a la sustitución de azúcar "mascabado" por azúcar refinada. En 1970 este último representaba el 25% del mercado, en la actualidad sobrepasa el 50% y se pronostica que para los próximos años, prácticamente el total del azúcar que se comercialice en el mercado internacional será refinada o productos de calidad y características equivalentes (29,33).

Esta panorámica del mercado internacional azucarero resume una tendencia en la cual el azúcar pierde cada vez más su valor de cambio como producto de comercialización internacional, más no así su valor de consumo, ya que por sus cualidades energéticas para la alimentación del hombre sigue siendo un alimento de gran consumo humano (33).

Estas circunstancias por las que transcurre la comercialización del azúcar, pueden mover a pensar que la industria azucarera se encuentra en camino de un colapso y que, por lo tanto, dejará de tener la importancia económica que para muchos países productores tiene. Sin embargo, la realidad puede tornarse totalmente distinta y esta encrucijada a donde ha llegado el mercado azucarero puede ser el punto de partida de una revolución tecnológica en la explotación de la caña de azúcar, a

partir de una renovación de la actual industria, con nuevos conceptos energéticos y de utilización de los subproductos.

Por otro lado, el surgimiento y desarrollo de otros edulcorantes naturales y sintéticos, en algunos casos con mayor poder edulcorantes que la sacarosa o menor poder calórico o menor costo de producción y en otros con todas las características unidas, han propiciado la irrupción de estos edulcorantes en el mercado donde la sacarosa no tenía tradicionalmente competidores.

La creciente participación de dichos edulcorantes en la demanda total, tiende a reducir el ritmo de crecimiento del mercado azucarero internacional y, consecuentemente, actúa como un elemento a la baja en los precios del azúcar. Este problema afecta entonces doblemente a los países exportadores, tanto por sus efectos sobre los precios, como por la contracción que sufre el ritmo de incremento de sus volúmenes de exportaciones.

Cuando se habla de los edulcorantes en general se distinguen dos tipos principales: los llamados edulcorantes calóricos o naturales, tales como el azúcar (de caña o de remolacha), los derivados del maíz (dextrosa, jarabe regular de maíz y jarabe de maíz rico en fructosa), la miel, el xilitol, etc. y los edulcorantes no calóricos o sintéticos, como los ciclamatos y la sacarina. Pueden mencionarse además los denominados edulcorantes de alta intensidad, como el aspartamo, el monellín y el miracullín (31,47).

Además, los países azucareros en el contexto mundial tienen que enfrentarse a la solución de tres grandes problemas: los

alimentos, los energéticos y la contaminación que la industria les produce.

Esta problemática ha significado la necesidad de llevar a cabo acciones en la búsqueda de soluciones y formas que les permitan rebajar los costos de producción mediante la optimización de la industria, la modernización de la agricultura y la industrialización de los derivados lo cual permitirá hacer más rentables las economías azucareras.

La caña de azúcar ofrece enormes posibilidades de aprovechamiento integral por medio de la industrialización de sus subproductos para la producción de derivados, con los cuales es posible solucionar algunos problemas que confrontan los países en diferentes ramas industriales tales como la demanda de pulpa y papel, tableros, alimentación animal necesidades energéticas, obtención de fondos exportables y/o sustitución de importaciones (32).

La diversificación, más que una respuesta a la crisis azucarera es, en cualquier circunstancia, factor de desarrollo ya que significa la implantación de nuevas industrias, nuevos renglones de producción, mayor interrelación industrial, mayor y mejor aprovechamiento de las materias primas y desarrollo científico y tecnológico (33,34).

Adicionalmente, se debe señalar que en la actualidad la industria azucarera es fuente de una alta contaminación. La quema de caña, los humos y finos producidos en la quema del bagazo (hollín), la cachaza y los efluentes líquidos, por su volumen y

agresividad constituyen un serio problema, del cual todavía no hay la conciencia y, menos aún, una respuesta efectiva. La integración a lo procesos de obtención de azúcar de fábricas de derivados como destilerías, papeleras, levadura, etc., complica aún más el problema.

Para tratar de disminuir este problema se han venido desarrollando técnicas que permitan la transformación de residuos y efluentes en productos comercializables, tales como los fertilizantes, el biogás, la proteína unicelular, etc (31,32,47).

2.1. Proceso de producción de azúcar

La fábrica de azúcar tiene como finalidad separar de la caña todos sus componentes que no son sacarosa, para aislar a ésta en forma de cristales. De hecho, la caña queda fraccionada en sus diferentes componentes básicos: fibra, agua, compuestos orgánicos y sacarosa (33) (Fig. 2.1).

2.1.1. Lavado y reducción de tamaño

Una vez que la caña se corta y carga, es transportada al ingenio.

La caña se recibe en el batey, donde se almacena la materia prima y ésta es transportada por medio de una grúa cañera hacia la mesa alimentadora que la conduce a un lavado por aspersión. Batey es una palabra de origen caribe que define actualmente al área de

recepción de la caña de azúcar. En aquellos lugares donde el suministro de agua escasea, prácticamente no se puede contar con un sistema de lavado, sino de una limpieza neumática. Una vez limpia se transporta la caña a dos juegos de cuchillas, tanto para obtener trozos más pequeños como para terminar de picar la caña sin extracción. De aquí es depositada en un segundo transportador de tablillas inclinadas, para que éste alimente al tándem de molinos.

2.1.2. Extracción de jugo

La extracción del jugo se efectúa en el departamento de molinos. Para tal efecto se cuenta con un juego de molinos. Cada molino consta de tres cilindros y de cuatro a siete molinos que forman una serie que se denomina tándem. Los cilindros están constituidos de hierro fundido, montados sobre un eje de acero que gira en chumaceras de bronce, soportados por dos virgenes o castillejos de hierro fundido que se fijan por tornillos a una base o bancaza de fundición, o de placas soldadas.

Estos cilindros, llamados mazas, tienen denominaciones específicas de acuerdo a su tarea. Sus nombres son maza cañera, bagacera y superior. Las dos primeras giran en el mismo sentido, la primera recibe la caña y la segunda la expulsa. La superior, situada arriba de ambas, girando en sentido contrario por presión, exprime la caña que circula por el equipo. La maza superior para realizar mejor su función, se encuentra sometida a un sistema de

presión hidráulica, el cual le da seguridad. A medida que pasa la caña por los molinos, las células vegetales se rompen y el jugo es expelido. Pero para que esta extracción se haga completa, es conveniente sustituir jugo rico en sacarosa, por agua. A este proceso se le denomina imbibición. La imbibición se usa en todos los tandems y consiste en aplicar agua o jugos diluidos sobre el bagazo antes de que éste entre y se exprima en un molino. La imbibición puede efectuarse de dos maneras: simple y compuesta.

Cuando se usa exclusivamente agua, aplicada en un solo lugar se llama "simple única", en dos lugares "simples dobles", etc. La imbibición compuesta utiliza parcialmente agua y parcialmente jugo diluido. El agua se agrega al bagazo que entra al último molino y el jugo extraído en éste se aplica al bagazo. El sistema compuesto es más usual, por que se logran mejores recuperaciones de sacarosa con menos gasto de energía.

El bagazo, que es el desecho de la caña, sirve como combustible para el departamento de calderas o se vende a la industria de la celulosa y el papel o de tableros.

2.1.3. Clarificación

El jugo mezclado que procede del área de molinos contiene muchas impurezas que es necesario eliminar. A este proceso se le denomina clarificación.

El guarapo (jugo de la caña) es bombeado a las básculas de guarapo y es aquí donde se sabe la cantidad de jugo que está

entrando a la fábrica. Al jugo se le da un tratamiento con lechada de cal para neutralizar su acidez, eliminar ácidos orgánicos y coagular materias en suspensión. Se calienta para ayudar a la separación de las impurezas precipitadas contenidas en el guarapo. Pasa a los clarificadores, o sea a los defecadores, que son tanques de sedimentación de heces con fondo inclinado o cónico y llaves de salida a varias alturas y se separa, por precipitación de lodos (conocidos como cachaza) del guarapo turbio.

Los lodos pasan a un aparato llamado filtro Oliver y su principal función es la de separar el jugo de la cachaza o desecho. Este jugo regresa al clarificador y la cachaza agotada se somete a una oxidación para que pueda utilizarse como abono.

2.1.4. Evaporación y cristalización

El jugo procedente de los clarificadores contiene de un 85 a 88% de agua y de 12 a 15% de sólidos solubles. El exceso de agua es necesario eliminarlo mediante un proceso de vaporización, el cual se lleva a cabo en evaporadores de cuádruple efecto. En estos aparatos el jugo se concentra hasta una concentración de 60° Brix máximo, es decir, antes de que aparezcan cristales de meladura. La meladura pasa a los tachos, en donde se cristaliza el grano hasta darle determinadas dimensiones.

El proceso de cristalización en tachos consiste en alimentar la solución a cada tacho. Este elemento es un evaporador de un

solo cuerpo que trabaja por templeas, donde se obtiene la sacarosa cristalizada, como consecuencia de la evaporación del agua donde está disuelta.

2.1.5. Centrifugado

El magma cristalino o masa cocida (masacote) que sale de los cristalizadores, se pasa a centrifugas donde se realiza la separación de azúcar de la miel que la rodea. La separación del azúcar en la centrifuga arroja como producto residual un licor madre (miel A). A la miel A se le incorpora determinada cantidad de meladura para fabricar una masa cocida B con 73 o 75% de pureza. En esta masa cocida los cristales representan del 43 al 50% del total de sólidos solubles presentes. Una segunda centrifugación separa el azúcar de calidad ligeramente inferior a la A, y deja como residuo miel B, con una pureza de aproximadamente 55%. A partir de la miel B, enriquecida y/o miel A, se fabrica la masa cocida C de pureza en torno a 60%. Para posibilitar la mayor cristalización posible de sacarosa, la masa cocida es sometida a enfriamiento moderado y lento en cristalizadores.

De la centrifugación se obtiene miel final con pureza aparente entre 32 y 40 % y azúcar C de cristales pequeños, unas 300 micras y calidad no apropiada para la comercialización.

Una parte de este azúcar, mezclado con suficiente meladura para formar un magma manejable como fluido, sirve como núcleo

crystalino (semilla) para las masas cocidas A y B, donde su tamaño aumenta hasta unas 800 micras. El resto es disuelto e incorporado a la meladura.

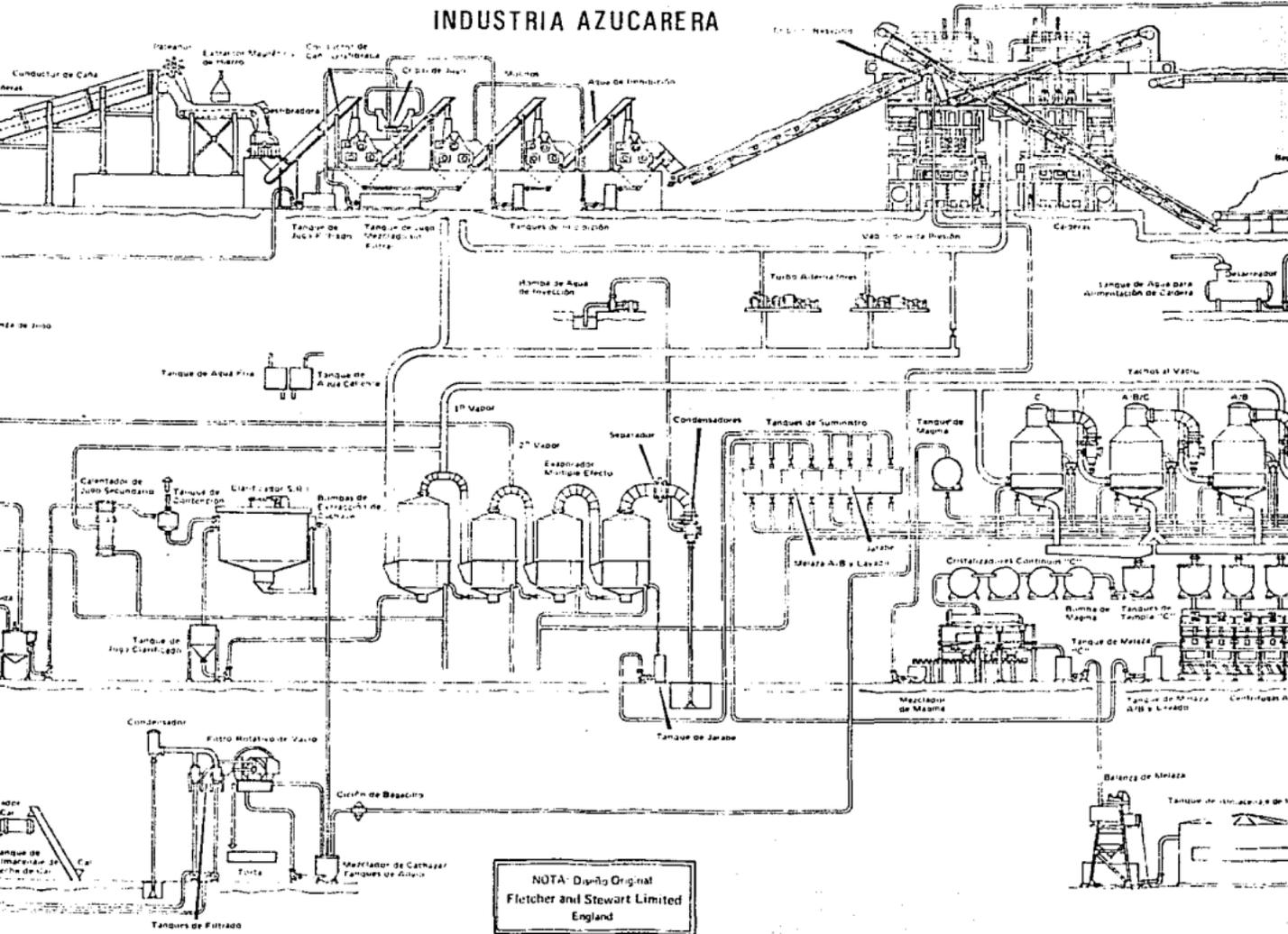
Las etapas finales, principalmente la masa cocida C, son las más difíciles y costosas y las que menor cantidad de azúcar producen.

2.1.6. Secado y envasado

El azúcar húmedo así obtenido de las centrifugas, se conduce en tolvas de distribución pasando éstas a los secadores por un conducto de gusano y un elevador de cangilones.

El secado se lleva a cabo por medio de aire caliente en secadores rotatorios continuos llamados granuladores. El granulador seca y separa los cristales entre sí. Después de dicha operación, el producto se dirige hacia las tolvas. Debajo de la tolva se encuentra una báscula la cual pesa porciones de 50 kg y a la vez la envasa en los sacos. Posteriormente, pasa por una máquina cosedora y de allí a su distribución.

INDUSTRIA AZUCARERA



NOTA: Diseño Original
Fletcher and Stewart Limited
England

2.2. Proceso de fabricación de alcohol etílico

La miel incristalizable, también conocida como miel final o melaza, constituye la materia prima más común en la producción de alcohol etílico mediante fermentación.

La producción de melaza está directamente ligada a la producción de azúcar, constituye una fracción del proceso y su obtención ocurre en la fase de centrifugación de la masa de azúcar.

Su composición es variable en función del grado de agotamiento, tipo de azúcar, calidad de la caña y otros (Tabla 2.1).

	Promedio	
	%	%
Agua	17 - 25	20
Sacarosa	30 - 40	35
Glucosa	4 - 9	7
Levulosa	5 - 12	9
Otras sustancias reductoras.....	1 - 5	3
Otros carbohidratos	2 - 7	4
Cenizas	7 - 15	12
Compuestos nitrogenados	2 - 6	4.5
No nitrogenados	2 - 8	5
Ceras esteroides esfosfolípidos	0.1 - 1	0.4
Pigmentos	----	---
Vitaminas	----	---

Tabla 2.1. Composición de la melaza (34)

Se presenta como un líquido viscoso, denso, rico en azúcares reductores y con un bajo contenido de agua. Por tratarse de un

líquido altamente concentrado, el efecto osmótico lo convierte en una materia prima no propicia para el desarrollo directo de la fermentación necesitando una adecuación en su concentración mediante diluciones para que el proceso fermentativo se desarrolle de manera eficiente.

2.2.1. Preparación del mosto y fermentación

El mosto es el sustrato apto para la fermentación por lo que se debe preparar de acuerdo a los requerimientos del microorganismo utilizado. De acuerdo con el diagrama de flujo para la producción de alcohol (fig. 2.2) la miel incristalizable a 85° Bx es cargada en un tanque de mezclado donde se diluye a una concentración de 14 a 18%.

Posteriormente se añade ácido sulfúrico ajustando el pH entre 4.0 - 4.5. La acidez favorece el desarrollo de la levadura y provoca el proceso de inhibición de las bacterias que son agentes contaminantes. A esta mezcla se le denomina mosto fresco.

El mosto fresco se distribuye al mezclador de mosto con levadura preparada y a las tinas para su fermentación.

Debido al desbalance de nutrimentos se suplementa la miel diluída acidificada y pasteurizada con sulfato de amonio y fosfato de amonio como nutrimentos para la levadura (C:N:P adecuada).

La mezcla del pasteurizador pasa al tanque de preparación de levadura donde se reproduce. Una vez que alcanza la concentración necesaria, se pasa el mosto con levadura a un mezclador con mosto

fresco (propagador) para de ahí, enviarlo a la tinas fermentativas (inóculo).

En las tinas fermentativas, en condiciones anaerobias, se llevan a cabo las reacciones químicas y bioquímicas para la producción de alcohol etílico, este proceso se realiza en un tiempo que varía entre 12 y 24 horas. Esta variabilidad puede deberse a exceso o falta de azúcar en el mosto, infecciones, variaciones de temperatura, inhibidores, falta de nutrimentos, pocas células viables en el medio, etc.

Con el desarrollo de la fermentación, ocurre un desprendimiento de calor, debido a que las reacciones son exotérmicas, con el consecuente aumento de la temperatura del medio, alcanzando valores máximos cuando más activo es el proceso, para después disminuir, tendiendo a alcanzar la temperatura del medio ambiente.

2.2.2. Destilación

Terminada la fermentación, el líquido fermentado (vino) se envía a un sistema de dos o tres columnas de destilación. En la primera columna fraccionadora se inicia la destilación por arrastre de vapor, lo que origina la separación de los componentes de más bajo punto de ebullición los cuales salen por el domo, constituida por agua, alcohol, aldehidos y cetonas. Del fondo sale una corriente líquida a una temperatura entre 85 y 88°C que se conoce como vinazas. Por la parte media se extrae una corriente

líquida de alcohol diluido (8 a 10°GL) que se alimenta a la columna depuradora.

La columna depuradora purifica el alcohol diluido, los vapores volátiles que salen por el domo de la columna pasan por un condensador y una parte retorna como fase líquida a la columna (conocida como reflujo) y otra sale como cabeza.

Las cabezas son alcoholes que contienen aldehidos y otras impurezas. De esta columna por la parte media sale alcohol etílico pasteurizado que contiene 50 - 60% de etanol y que se envía a la columna de rectificación. En el domo de esta última se cortan los compuestos ligeros y parte se reflujan. Por la parte media se extrae alcohol potable que es contabilizado por medio de un medidor de alcohol. Este alcohol pasa a los tanques de aforo, y de ahí a los tanques de almacenamiento. Este producto alcanza una concentración final de 95 - 96°GL. En la parte inferior de la columna, se purgan los platos a fin de extraer los productos pesados constituidos por alcoholes amílicos y residuos de aceite fusel. A este material se le llama colas. De las colas, por gravedad se separa el aceite fusel, y los alcoholes amílicos son recirculados al sistema. El aceite fusel, puede ser usado en la industria de la perfumería como disolvente o fijador, ya que es una mezcla de alcoholes superiores de alto punto de ebullición y de densidad superior al del alcohol etílico (36).

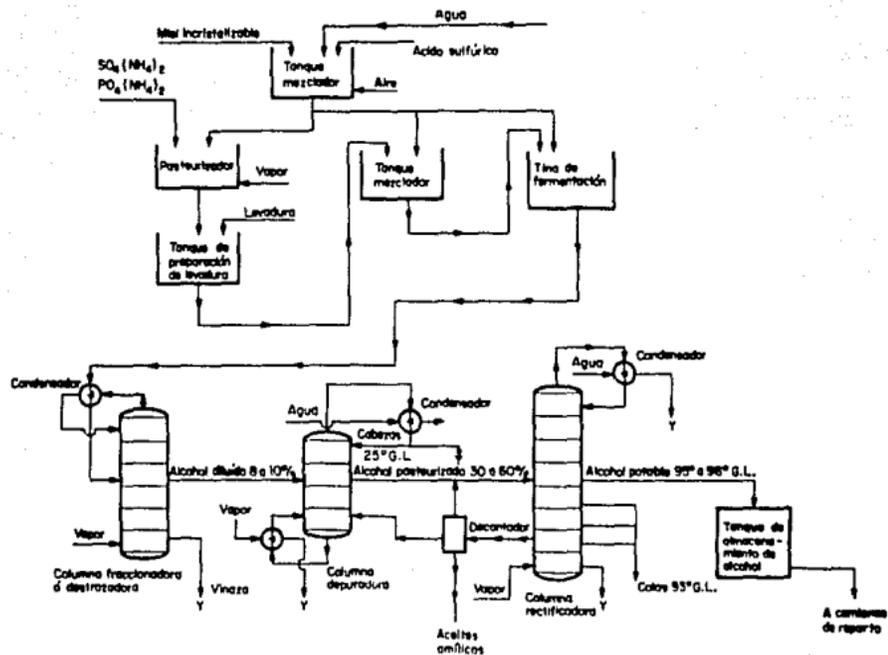
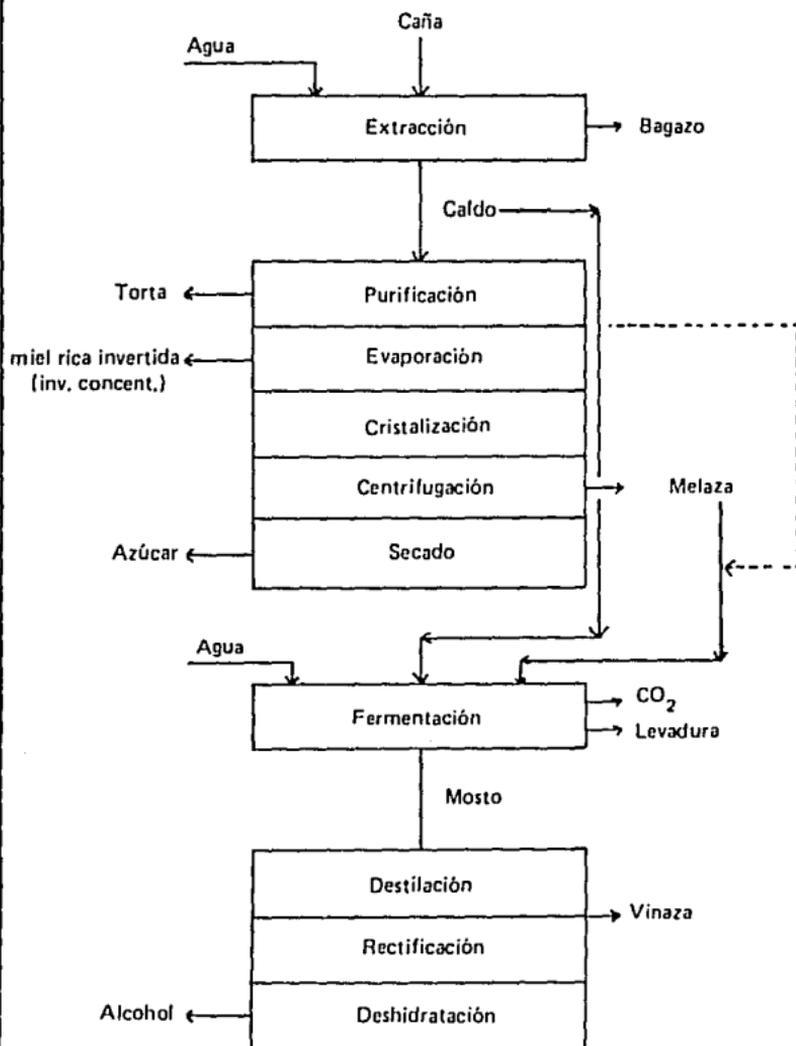


Fig 2.2 Proceso de elaboración de alcohol etílico (50)

DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE PRODUCCION SIMULTANEA
DE AZUCAR, ALCOHOL, MIEL RICA INVERTIDA (HTM)
Y SUBPRODUCTOS (31)



2.3. Efluentes en la industria azucarera

Durante el proceso de industrialización de la caña de azúcar se genera una cierta cantidad de residuos líquidos, sólidos y gaseosos, cuyas características potencialmente contaminantes hacen necesario su tratamiento con el fin de lograr una recirculación parcial de algunos de ellos y de disminuir su impacto negativo en los cuerpos receptores o en las zonas de disposición final (12) (Tabla 2.2).

Los ingenios azucareros utilizan grandes cantidades de agua al llevar a cabo sus procesos, por lo que los volúmenes de agua residual son altos.

Para facilitar los estudios del agua y los efluentes residuales en la industria se debe conocer la fuente de los distintos efluentes parciales que van a formar el efluente total de la fábrica. Al respecto Kastner (37) sugiere que las aguas residuales se dividan según sus propiedades fisicoquímicas y biológicas, sean tratadas separadamente y que se construyan diferentes equipos de depuración adecuados a su diferentes características (Tabla 2.3).

En general las aguas involucradas en el proceso de fabricación de azúcar y que dan origen a las aguas residuales son de dos tipos; aguas crudas o de suministro y aguas de condensados.

**Tabla 2.2 Aguas residuales, desecho y emisiones en un Ingenio
azucarero (77).**

AGUAS RESIDUALES:

Agua de lavado de caña

Agua de enfriamiento de molinos

Arrastre líquido de cachaza

Agua de condensados

Aguas de limpieza de evaporadores

Agua de purga de calderas

Agua de lavado de pisos

Agua residuales domésticas

Agua de lavado de emisiones atmosféricas

Arrastre líquido de vinazas

LODOS RESIDUALES

- lodos primarios, cachaza y lodos obtenidos de sistemas de
tratamiento primario de aguas residuales.

-Lodos secundarios, lodos obtenidos de sistema de tratamiento
biológico de aguas residuales.

RESIDUOS SOLIDOS

Cenizas de calderas

Basura doméstica

Bagazo

EMISIONES ATMOSFERICAS

Gases, humos y polvo

Tabla 2.3 Dispositivo para el control de la contaminación en la industria azucarera (77).

AGENTE CONTAMINANTE	SISTEMAS Y EQUIPO
Agua de lavado de caña	Envío de aguas a equipos clarificadores para separar tierra y arena y sistemas de tratamiento biológico secundario si hubo pérdidas de azúcares en el agua ($DBO_5 > 20$ mg).
Agua de enfriamiento de molinos	Envío de aguas a trampas para separar grasas de aceites.
Agua de condensadores	Instalación de equipos enfriadores y recirculación al proceso.
Aguas de limpieza de evaporadores	Dirigirlas a un tanque de homogeneización-neutralización y separación de sales.
Agua de purga de calderas	Tanque de homogeneización-neutralización y separación de sales.
Aguas residuales domésticas	Instalaciones de sistemas de tratamiento por métodos biológicos.
Arrastre líquido de vinazas	Conducción a canales para su riego, concentración para su utilización como alimento. Concentración y secado para su uso como alimento animal (en exp.). Tratamiento aerobio y an aerobio para producir biogás y proteína (en exp.).

Cachaça

Conducción en forma suspendida por canales para su uso en riego. Manejo en forma semi-sólida en tolvas y envío al campo. Sedimentación en fosas y posteriormente dragado en ellas.

Agua de lavado de emisiones atmosféricas

Tratamiento en fosas de sedimentación.

Cenizas de calderas

Clasificadores de cenizas, similares al del agua de lavado de caña.

Humos y polvos

Uso de deshojadores o de lavadores de gases

2.3.1. Aguas crudas o de suministro

Se extraen de pozos, ríos y otros, fundamentalmente se utilizan para el enfriamiento de equipos, tales como bombas de vacío, turbo-generadores, chumaceras de tándem y cristalizadores.

Las aguas no deben ser utilizadas en la generación de vapor de las calderas, pues hay que tratarlas de forma drástica para evitar fundamentalmente incrustaciones en las superficies de calentamiento, por lo que es más económico utilizar aguas de condensados para este fin.

2.3.2. Aguas de condensados y residuales

Son las que proceden de la recolección de los condensados obtenidos en los diferentes equipos de calentamiento y evaporación de la fábrica ó en general, hay un gran desperdicio de estas aguas de alta calidad que provocan pérdidas de recursos económicos e incrementan grandemente el caudal de aguas residuales, por lo que se puede evitar dotando a los ingenios de las instalaciones adecuadas que permitan almacenar y desviar cuando fuera necesario los retornos (68).

Muchos investigadores hasta el presente (69) han planteado que con el máximo uso de los condensados mediante una correcta recirculación se puede lograr la eliminación total o parcial de las aguas crudas en los ingenios azucareros. Los condensados deben ser empleados en la imbibición, lavado de filtros, preparación de

la lechada de cal, en las centrífugas para la purga de las templas y para las diluciones de las mieles A y B (50).

2.3.3 Aguas residuales

Se entiende por aguas residuales los desechos líquidos que se producen en las diferentes actividades socioeconómicas y productivas: industrias, viviendas, instalaciones agropecuarias y otros. En la tabla (2.4) se recoge una lista de los ocho componentes de contaminantes que habitualmente transportan las aguas residuales. Estos varían, naturalmente, con su origen y la magnitud del cuidado del agua y de los residuos que se tengan en la planta de manufactura antes de la descarga.

En la industria azucarera y sus derivados, los desechos se originan en los procesos de fabricación, por lo que existen diferencias entre los ingenios que fabrican mascabado, azúcar estándar, azúcar refinada y las que tienen destilerías. La caracterización de sus efluentes es particular para cada ingenio, debido a las diferencias mencionadas previamente. Sin embargo, existen parámetros del gasto y composición dentro de las cuales caen las descargas de muchos ingenios.

Los contaminantes más significativos de algunas descargas de aguas residuales, se muestran en las tablas (2.5, 2.6, 2.7). Los valores de carga orgánica medida como (DBO_5) para algunos efluentes y su comparación con el intervalo de valores para este parámetro, fijados en las condiciones particulares de descarga de

TABLA 2.4 COMPONENTES RECHAZABLES DE LAS AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES, SUS CONSECUENCIAS Y SU ORIGENES TÍPICOS

Componentes	Consecuencias	Orígenes físicos
1. Bloxidables expresados como DBO_5	Desoxigenación, situaciones anaerobias, peces muertos.	Grandes cantidades de carbohidratos solubles: refinado del azúcar; enlatado; destilerías; fábricas de cerveza; tratamiento de la leche; pulpa y fabricación del papel.
2. Tóxicos primarios: As, CN, Cr, Cd, Cu, F, Hg, Pb, Zn.	Peces muertos, ganado envenenado, plancton muerto, acumulaciones en la carne de los peces y moluscos.	Limpeza de los metales, recubrimientos galvánicos y decapado de metales; tratamiento de fosfatos y bauxita; producción de cloro; fabricación de acumuladores; enlatado
3. Ácidos y álcalis.	La eliminación de los sistemas amortiguadores de pH desorganiza los sistemas ecológicos previos.	Drenaje de las minas de carbón; decapado del acero; manufactura química y textil; limpieza de la lana; lavanderías.
4. Desinfectantes: Cl_2 , H_2O_2 , formalina, fenol.	Muertes selectivas de microorganismos, sabores y olores.	Blanqueado textil y del papel; cohetería; síntesis de resinas; preparación de gas, coque y alquitrán mineral; manufactura química y colorantes.
5. Formas iónicas: Fe^{2+} , Ca, Mg, Mn, Cl^- , SO_4^{2-}	Cambios de características del agua: dureza, salinidad, incrustaciones	Metalurgia; fabricación de cemento; cerámica; bombeo de los pozos de petróleo.
6. Agentes de oxidación y reducción: NH_3 , NO_2^- , NO_3^- , S^{2-} , SO_3^{2-}	Equilibrios químicos alterados, extendiéndose desde agotamiento rápido del oxígeno a supernutrición, olores, crecimientos microbianos selectivos.	Producción de gas y coque; industrias; manufactura de explosivos; fabricación y teñido de fibras sintéticas; pulpero de madera, blanqueo.
7. Evidentes para la vista y el olfato.	Espumas, sólidos flotantes, sedimentables, olores; depósitos anaerobios en el fondo; aceites y grasas; daños a las aves acuáticas y peces.	Residuos de detergentes; enlatado; procesado de carnes y alimentos; molinos de azúcar de caña y remolacha y para la lana; relleno de aves; refinerías de petróleo.
8. Organismos patógenos B. anthracis, leptospira, hongos tóxicos, virus.	Infecciones en el hombre, reinfecciones en la ganadería, enfermedades en las plantas procedentes de las aguas de riego	Residuos de mataderos; procesado de la lana; crecimiento de hongos en las plantas de tratamientos de residuos; aguas residuales del procesamiento de aves de corral.

Tabla 2.5 Caracterización promedio del agua residual proveniente de la fabricación de azúcar mascabado (61)

PARAMETRO	Concentración (mg/L)		
	Mínima	Promedio	Máxima
pH'	5	7	8
Temperatura (°C)	24	31	38
Demanda bioquímica de oxígeno	1	149	27546***
Demanda química de oxígeno	1	153	149345***
Sólidos totales	20	428	756
Sólidos totales volátiles	18	205	442
Sólidos suspendidos totales	15	65	160
Sólidos suspendidos volátiles	14	59	125
Sólidos sedimentables*	0.1	5	313
Materia flotante**	0	1	2
Nitrógeno total	0.1	1	27
Fosfatos totales	2	7	19
Grasas y aceites	1	36	441

..Adimensional

* en ml/L

** en ml/L

*** con arrastre de cachaza

Tabla 2.6 Caracterización promedio del agua residual proveniente de la fabricación de azúcar estándar (61)

PARAMETRO	Concentración (mg/L)		
	Mínima	Promedio	Máxima
pH [†]	6	7	10
Temperatura (°C)	18	37	88
Demanda bioquímica de oxígeno	20	714	36700 ^{***}
Demanda química de oxígeno	47	1091	176635 ^{***}
Sólidos totales	400	917	60200
Sólidos totales volátiles	85	456	31620
Sólidos suspendidos totales	20	418	46190
Sólidos suspendidos volátiles	20	335	25216
Sólidos sedimentables ^{**}	0.1	3	650
Materia flotante ^{**}	0	1	2
Nitrógeno total	0.2	14	1260
Fosfatos totales	0.2	21	2000
Grasas y aceites	0	66	570

† Adimensional

• en ml/L

** en ml/L

*** con arrastre de vinaza y cachaza

Tabla 2.7 Caracterización promedio del agua residual proveniente de la fabricación de azúcar refinado (61)

PARAMETRO	Concentración (mg/L)		
	Mínima	Promedio	Máxima
pH'	5	7	7
Temperatura (°C)	30	36	66
Demanda bioquímica de oxígeno	93	1091	4509***
Demanda química de oxígeno	154	1170	12466***
Sólidos totales	250	1802	14916
Sólidos totales volátiles	142	757	11652
Sólidos suspendidos totales	20	610	8210
Sólidos suspendidos volátiles	10	305	5620
Sólidos sedimentables*	0.4	3	18
Materia flotante**	0	3	8
Nitrógeno total	0	5	112
Fosfatos totales	0.4	--	4
Grasas y aceites	3	147	317

..Adimensional

* en ml/L

** en ml/L

*** con arrastre de vinazas

algunos ingenios, muestra que la carga orgánica total rebasa en gran medida los valores permitidos. Existen también otros parámetros que tienen valores mayores a los permitidos tales como la materia flotante, sólidos sedimentables, grasas, aceites, pH, temperatura en aguas de condensados, vinazas y coliformes totales para aguas domésticas e industriales.

Estas aguas contienen millones de microorganismos y gran número de sustancias y compuestos orgánicos que, al acumularse unos y transformarse otros, afectan el medio ambiente. El principal efecto adverso sobre las corrientes receptoras es provocado por la materia orgánica, en particular la disuelta que disminuye el contenido de oxígeno disuelto en el seno del líquido receptor.

Cualquier corriente puede utilizarse para arrastrar los efluentes líquidos residuales, siempre y cuando las materias descargadas en las aguas receptoras no pongan en peligro el sistema ecológico de la región. Cuando las aguas residuales contienen una elevada cantidad de materia orgánica y ésta no puede ser diluida de una manera adecuada para ser vertida, debe ser tratada.

El peligro de las aguas residuales no está solamente en su efecto económico directo, sino en su efecto indirecto, ya que cuando se contaminan las aguas superficiales y subterráneas surge una amenaza de alcance impredecible para la salud de la población, así como trastornos en la producción, en la agricultura y la propia economía del agua (69, 41).

2.3.4. Vinazas

La vinaza constituye el principal residuo de la fabricación de alcohol. Su volumen varía entre 12 y 15 litros por litro de alcohol producido, dependiendo del origen y composición de la materia prima utilizada, del tipo y preparación del mosto y de los procesos de fermentación y destilación que se realicen. Es un producto altamente contaminante.

Los valores promedio deben tomarse con una debida reserva, como los que se muestran en la tabla (2.8). En ella se observa, que la composición de las vinazas varía dependiendo de si la materia prima utilizada para la fermentación es melaza o jugo de caña.

ELEMENTOS	Melaza	Mixto	Jugo de caña
Nitrógeno (N)	1.18	0.70	0.28
Fósforo (PO)	0.15	0.11	0.13
Potasio (KO)	7.83	4.57	1.22
Calcio (CaO)	3.64	1.72	0.69
Magnesio (MgO)	0.99	0.66	0.21
Sulfato (SO)	6.40	3.73	0.62
Carbono (C)	19.20	11.50	5.90
Materia orgánica	63.40	38.00	19.50
Relación C/N	16.27	16.43	21.07

Tabla 2.8. Composición de la vinaza en función de la naturaleza del mosto (kg/metro cúbico) (17)

Debido a que se trata de un efluente con una elevada demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), así como su bajo pH y temperatura de 95 - 98°C a la que se descarga, preocupa tanto a autoridades como empresarios, investigadores y técnicos dedicados a obtener alternativas de utilización económica, evitando siempre el deterioro del medio ambiente. La vinaza como todo residuo industrial presenta variabilidad en su composición, por lo que se debe hacer su caracterización ya que para llevar a cabo un tratamiento es necesario conocer las características de estas aguas residuales (13).

2.4. Tratamiento de los efluentes líquidos

Son muchos y muy complejos los métodos y equipos utilizados para el acondicionamiento de los efluentes líquidos. Un sistema completo de tratamiento puede incluir de forma general los siguientes procesos:

- TRATAMIENTO PRELIMINAR
- TRATAMIENTO PRIMARIO
- TRATAMIENTO SECUNDARIO (BIOLOGICO)
- TRATAMIENTO Terciario (FISICOQUIMICO)

Esta clasificación, así como cualquier otra sobre los métodos de tratamiento, es arbitraria.

2.4.1. Tratamiento preliminar

Tiene como objetivo la remoción de aquellos desechos formados por materiales voluminosos. Pueden usarse uno o varios de los siguientes dispositivos para este tratamiento:

1. Rejas de barras o rejas finas
2. Desarenadores
3. Desmenzadores
4. Tanques de pre-aeración
5. Trampas de grasa

2.4.2. Tratamiento primario

En este tratamiento se separa o elimina la mayor parte de la materia sedimentable de las aguas residuales, aproximadamente del 40 - 60% se separa por medios físicos y mecánicos. El proceso de sedimentación puede ser acelerado con la ayuda de productos químicos como algunas sales de hierro, alumbre y floculantes sintéticos. El propósito fundamental de los dispositivos usados en este tratamiento es disminuir suficientemente la velocidad de las aguas para que puedan sedimentar los sólidos. Estos dispositivos son llamados tanques de sedimentación que por, su diversidad de diseños, pueden dividirse en cuatro grupos generales:

1. Tanques sépticos
2. Tanques de doble acción
3. Tanques de sedimentación simple ascendente con eliminación

mecánica de cienos (lodos)

4. Clarificadores de flujo ascendente con eliminación de cienos (lodos)

2.4.3. Tratamiento secundario (biológico)

Este tratamiento debe hacerse cuando las aguas residuales surgidas del tratamiento primario, posean una gran cantidad de sólidos orgánicos tal que no puedan ser asimilados por las aguas receptoras sin afectarlas. El tratamiento secundario depende principalmente de la capacidad de los organismos aerobios ó anaerobios para la descomposición de los sólidos orgánicos, hasta su transformación en sólidos inorgánicos o en orgánicos más estables. En el capítulo siguiente se tratarán los dispositivos usados.

2.4.4. Tratamiento terciario (físicoquímico)

Las materias orgánicas como detergentes, plaguicidas, compuestos sintéticos, colorantes y otros, así como los iones metálicos, pasan a través de los tratamientos convencionales (primario y secundario), prácticamente, sin cambio alguno; por lo que, cuando los efluentes van a ser utilizados como abastecimiento, se requiere de los tratamientos terciarios como recurso para eliminar estas sustancias.

Entre los tratamientos terciarios se tienen:

1. Floculación
2. Adsorción con carbón activado
3. Intercambio iónico
4. Electrodialísis
5. Osmosis inversa
6. Destilación
7. Congelación
8. Flotación
9. Cloración

Para el tratamiento de las aguas residuales de los ingenios azucareros se han utilizado los sistemas de lagunas de oxidación, también los filtros biológicos o lechos bacterianos y los procesos de lodos activados. Las lagunas de oxidación tienen bajos costos de inversión y operación, pero este sistema requiere de grandes extensiones de terreno, no puede construirse en suelos permeables, ni donde el manto freático esté cercano a la superficie. Todos estos hechos limitan la utilización de las lagunas.

La utilización de lechos bacterianos y lodos activados tienen mayores eficiencias que las lagunas de oxidación, requieren de menos espacio y presentan variantes muy ventajosas en la utilización del agua residual tratada, pero los costos de inversión son elevados y esto es una desventaja a considerar, por lo que se buscan alternativas de tratamiento que puedan ser autofinanciables. Esto es, que a partir de los efluentes se puedan obtener fertilizantes, biogás, proteína unicelular, con lo que se pasaría de tener desechos contaminantes a productos comercializables (7, 11, 18, 46, 51).

3. PROCESO DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO

El tratamiento biológico de las aguas residuales se basa en un proceso donde una población de microorganismos descompone la materia orgánica para utilizarla como fuente de nutrimentos. Este es el mecanismo por el cual las corrientes de aguas naturales, como lagos y ríos, se autopurifican.

La purificación biológica se utiliza comúnmente para tratar aguas de desecho que contienen materia orgánica disuelta. Las bacterias desdoblan los compuestos complejos en otros más sencillos y estables; los productos finales normales son bióxido de carbono, agua, nitratos y sulfatos (16).

Las aguas residuales que contienen solutos contaminantes se ponen en contacto con una densa población de microorganismos apropiados, durante un tiempo suficiente que permita a los microorganismos descomponer o eliminar los solutos contaminantes.

Por lo general, es a través de la oxidación del metabolismo microbiano y conversión en materias microbianas celulares. En el tratamiento biológico los organismos que contribuyen a la remoción del sustrato tienden a ser de autoselección por lo que no es necesario tomar estrictas precauciones de operación.

Los microorganismos se pueden dividir en aquellos que necesitan oxígeno para su crecimiento y los que no lo necesitan. Los que lo requieren se describen como aerobios y el oxígeno debe estar disponible en forma de oxígeno libre disuelto. A los organismos que sólo pueden crecer en presencia del oxígeno se les

llama aerobios obligados. Los que crecen en ausencia total del oxígeno se les llama anaerobios obligados.

Algunos organismos son capaces de cambiar su metabolismo de manera que pueden crecer esté presente o no el oxígeno y se les llama facultativos.

El oxígeno libre disuelto es el reactivo esencial para los procesos aerobios, y cuando los organismos aerobios utilizan los nutrimentos orgánicos, consumen al mismo tiempo el oxígeno disuelto. Si no se repone el oxígeno disuelto, el crecimiento aerobio se detiene cuando se agota el oxígeno y sólo pueden continuar los procesos anaerobios que son más lentos y mal olientes (generan metano, amoníaco y ácido sulfhídrico).

La disponibilidad del oxígeno libre disuelto en el agua es, por lo tanto, el factor clave que limita la capacidad de autopurificación de una corriente de agua.

Algunos tipos de microorganismos son capaces de utilizar el oxígeno combinado en compuestos químicos disueltos como nitratos y nitritos cuando no está disponible el oxígeno libre disuelto, por lo que los procesos son aerobios-anóxicos o anaerobios-anóxicos.

Cuando la materia orgánica se pone en contacto con el lodo biológico, la materia orgánica disuelta, medida como demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) se remueve por varios mecanismos. Los sólidos suspendidos y muy finos se eliminan por medio de la adsorción y coagulación. Parte de la materia orgánica soluble se remueve inicialmente por medio de absorción y se almacena en la célula como reserva de alimento. La materia orgánica restante en

disolución se remueve progresivamente durante el proceso de aeración, resultando en la síntesis de lodo y la producción de bióxido de carbono y agua (42, 46).

La facilidad de oxidación de la materia orgánica disminuye a medida que la complejidad de los compuestos aumenta. Las partículas grandes se subdividen por medio de la hidrólisis antes de oxidarse. Las reacciones que representan la remoción de la DBO durante la bioxidación se pueden interpretar de la siguiente manera:

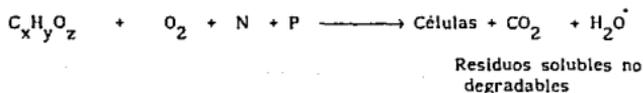
1. La remoción inicial de la materia orgánica al ponerse en contacto los desechos con un lodo biológicamente activo, que la almacena como reserva de alimento.

2. La remoción está en proporción directa al crecimiento del lodo biológico.

3. Oxidación de la materia celular biológica a través de respiración endógena.

Estas reacciones se ilustran con las siguientes ecuaciones:

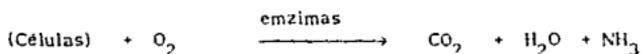
Oxidación de materia orgánica:



Síntesis de materia celular:



Oxidación de materia celular:



Los procesos aerobios son bioquímicamente eficientes y rápidos y generan productos secundarios que casi siempre son químicamente simples y están altamente oxidados, como el anhídrido carbónico y el agua. Los procesos anaerobios son bioquímicamente más lentos y dan origen a productos secundarios químicamente complejos y/o malolientes.

Los dos principales procesos de tratamiento biológico son los sistemas floculados (lagunas de estabilización) y los sistemas de película biológica. También se han desarrollado procesos de tipo anaerobio floculados y de película fija pero su uso no es tan común como los de tipo aerobio.

3.1. Sistemas floculados aerobios

3.1.1. Lodos activados

El proceso de lodos activados es el proceso biológico más utilizado para el tratamiento de aguas residuales y se le han hecho muchas adaptaciones para satisfacer aplicaciones particulares.

El principio básico del proceso consiste en que las aguas residuales se pongan en contacto con una población microbiana

mixta, en forma de suspensión floculenta en un sistema en el que se hace pasar aire a través del líquido. Esto desarrolla una suspensión bacteriana que da origen a la descomposición aerobia.

Una vez que se alcanza el grado de tratamiento que se desea, la masa microbiana floculenta, conocida como lodo, se separa del agua residual por sedimentación. La mayor parte del lodo asentado en la etapa de separación se regresa a la etapa de aeración para mantener la concentración de los lodos en el tanque de aeración al nivel necesario para su tratamiento efectivo y para que actúe como inóculo microbiano. Parte de estos lodos se extraen para su descarga. Las eficiencias de purificación varían del 75 al 95% dependiendo del agua de desecho y de la concentración de bacterias que contenga el agua del tanque de aeración. Casi siempre pueden obtenerse mayores eficiencias con concentraciones bacterianas más altas, pero para esto debe tenerse en cuenta que se requiera una mayor cantidad de aire (48, 63).

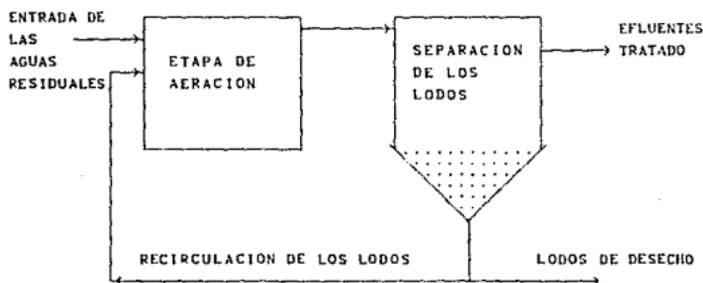


FIG. 3.1 Características esenciales de los procesos de lodos activados

3.1.2. Lagunas de oxidación

Las lagunas de oxidación o estanques de estabilización son una modificación del proceso de lodos activados. En esta adaptación, el agua de desecho se retiene durante varios días en un estanque poco profundo. Con la aeración que recibe desde la atmósfera se propicia el desarrollo de crecimientos bacterianos. En estos estanques puede eliminarse hasta el 95% de la DBO y destruirse el 99% de las bacterias coliformes. En consecuencia, el grado de purificación obtenido, casi siempre permite que el efluente se descargue a una corriente (62).

3.2. Sistema de película biológica aerobia

En este proceso se ponen en contacto las aguas residuales con una población microbiana en forma de película que está adherida a la superficie de un medio sólido. Este medio sólido puede estar fijo o en movimiento. En el primer caso, el agua residual se mueve sobre el medio fijo y en el segundo caso, el medio se mueve a través del líquido. Los reactores de película han estado en uso desde hace mucho tiempo para el tratamiento de las aguas residuales (55).

3.2.1. Sistemas de medio fijo

En los sistemas de medio fijo, el medio sólido de soporte está dispuesto en forma de un lecho empacado a través del cual pasa el agua residual, las superficies (arena, roca porosa, rellenos o empaques sintéticos) del medio de empaque desarrollan una película microbiana y el agua residual fluye sobre la superficie del empaque en una capa delgada que está en contacto con los microorganismos por una lado y con la atmósfera en los espacios intersticiales del empaque por el otro (46).

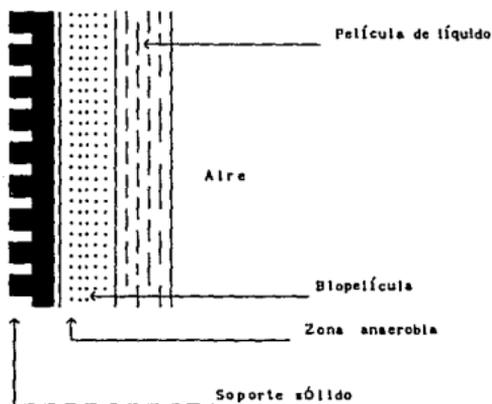


Fig 3.2 Sistema de biopelícula

El oxígeno se disuelve en la superficie del líquido en movimiento y es transferido a través de la capa líquida a la superficie microbiana. El oxígeno y los nutrimentos del líquido se difunden hacia dentro de la película microbiana para ser metabolizados por éstos.

Estos reactores son conocidos con una serie de nombres diferentes, la mayoría de ellos no representan realmente su operación. Se les llama filtros de goteo, filtros biológicos, biofiltros, filtros de percolación, percoladores o lechos bacterianos. Actualmente, se tiende a llamarlos reactores empacados.

3.2.1.1. El "filtro percolador" o reactor empacado

El filtro percolador es un lecho de roca granulada, o cualquier otro material inerte que se sostiene mediante un sistema de drenaje inferior para la recolección del líquido que fluye por encima de él. En la parte superior hay un distribuidor giratorio que disemina el agua sobre el lecho de un modo uniforme. El sistema inferior de drenado tiene muchos ductos de aire que permite que éste circule a través del lecho impulsado por corrientes naturales, esto proporciona el oxígeno necesario para una buena acción biológica. La piedra ofrece una superficie para el crecimiento de los organismos que efectúan la descomposición aerobia. Las dimensiones del lecho en que se dispone el medio sólido de soporte dependen de la naturaleza del medio y de la

concentración y tipo del agua residual por tratar. Las eficiencias de las unidades individuales de "percolación" varían de 35 a 85% para la eliminación de la materia orgánica. Cuando se requieren eficiencias más elevadas, se instala una segunda unidad para que opere en serie con la primera, aplicando un tratamiento en dos etapas. Se obtiene casi siempre una purificación del 80 a 95% .

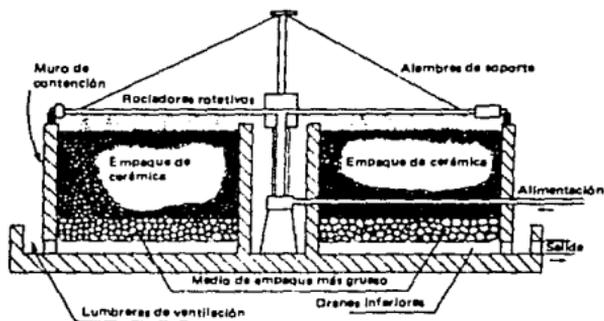


Fig 3.3 Percolador convencional

3.2.2. Sistemas de medios en movimiento

En los sistemas de medios en movimiento, la película microbiana y el medio sólido de soporte a la que está adherida, se mueven a través del líquido que está bajo tratamiento.

Los principales sistemas que utilizan este principio son los lechos fluidificados y los reactores biológicos rotatorios.

3.2.2.1. Sistema de lecho fluidicado (fluidizado)

Estos sistemas son una combinación de los sistemas de crecimiento adherido y de crecimiento en suspensión. Se desarrolla una película biológica sobre un medio sólido de soporte que consiste de partículas suficientemente pequeñas para ser mantenidas en suspensión, por medio de flujo ascendente del líquido bajo tratamiento (25, 64).

Las ventajas que se obtienen de estas condiciones son: se elimina el peligro de bloqueo del lecho por la acumulación de biomasa sobre el medio sólido de soporte, como sucede en el sistema de lecho fijo, ya que las partículas tienen libertad de movimiento. La superficie específica de las pequeñas partículas de soporte sólido es muy alta y puede ser equivalente a varios miles de metros cuadrados por metro cúbico del lecho, se mantienen altas

densidades de biomasa, es controlable y no representa las amplias variaciones estacionales que se encuentran en los sistemas de medio fijo.

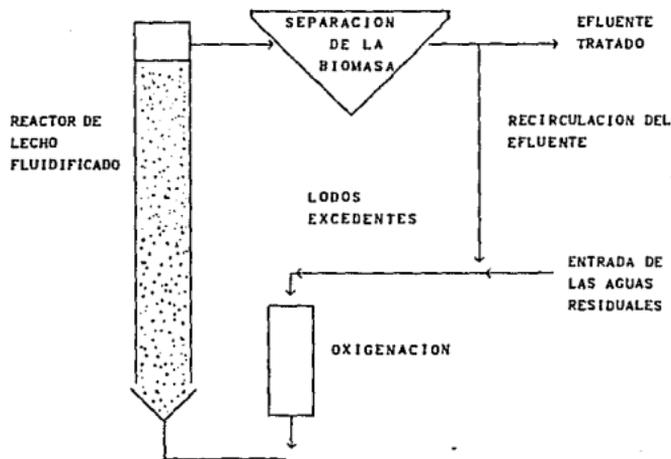


Fig 3.4 Esquema de un reactor de lecho fluidificado

3.2.2.2. Reactor biológico rotatorio

El reactor biológico rotatorio (RBR) es uno de los sistemas más recientemente usados para el tratamiento de las aguas residuales. De este sistema ya existen instalaciones comerciales en los países del primer mundo.

El RBR original consiste en una serie de discos con diámetros que varían entre 2.5 y 3.5 m con un espaciamiento entre 2 y 5 cm.

Estos discos giran lentamente sobre un eje horizontal dentro de un tanque, el cual está constituido por una serie de cámaras, de tal manera que aproximadamente el 40% de la superficie de los discos, se sumerge en las aguas residuales.

Sobre la superficie de los discos se forma una biopelícula, la cual provoca la metabolización del material orgánico e inorgánico contenido en el agua de desecho. Al rotar el tren de discos, la biopelícula se ve así sucesivamente expuesta a los nutrientes, al aire y se provoca cuando existe un exceso de biomasa un mecanismo de cizallamiento con el líquido contenido en el reactor. Por ello, entre otros factores, se mantiene la biopelícula de un grosor relativamente homogéneo (14, 23, 25).

Al multiplicarse los microorganismos, el espesor de la biopelícula empieza a aumentar hasta que el oxígeno que se difunde en la biomasa es consumido antes de que llegue a los microorganismos que están próximos al medio inerte. Esto provoca que se forme un medio anaerobio. También la materia orgánica es metabolizada antes de que llegue a lo más profundo de la

biopelícula provocando que los organismos más cercanos al medio de soporte entren a una fase de crecimiento endógeno y pierdan la habilidad para adherirse al material de soporte. Las condiciones anaerobias ocasionan la formación de bolsas de gases lo que tiene por resultado que la biopelícula se empiece a desprender del soporte y el esfuerzo cortante que sufre la biopelícula al friccionarse contra el agua de desecho termine arráncandola. Este es otro de los mecanismos que mantiene a la población microbiana relativamente constante en los discos. Los microorganismos que se desarrollan sobre la superficie de los discos pueden ser bacterias, algas, hongos, protozoarios, entre estos últimos los ciliados (42).

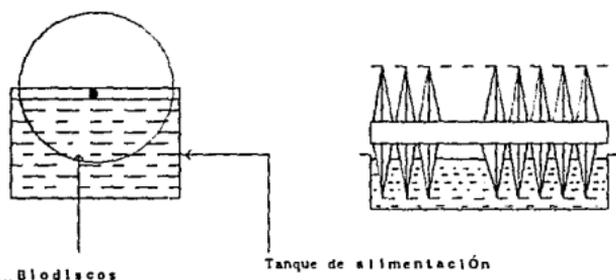


Fig. 3.5 Reactor biológico rotatorio

El agua residual, una vez tratada en el reactor, se recolecta en un sedimentador secundario donde, por gravedad se separa, la biomasa producida en el reactor. A partir de los años setenta, se han hecho modificaciones en el tren de discos para aumentar el área superficial sin incrementar el consumo energético durante su rotación. Se han generado patentes como el "biosurf" (73) y desarrollos como el "biotambor" (54), pero el principio de operación es el mismo.

3.3. Tratamiento anaerobio floculado

3.3.1. Tratamiento anaerobio floculado clásico (digestión)

En el tratamiento anaerobio las aguas residuales son mezcladas con grandes cantidades de microorganismos, pero en ausencia de oxígeno. Dentro de estas condiciones los microorganismos crecen y son capaces de convertir los residuos orgánicos a dióxido de carbono y a otros (metano, ácido sulfhídrico, amoníaco, etc) (63).

La digestión anaerobia puede considerarse de manera simplificada en tres etapas:

1. Los compuestos de alto peso molecular, como las proteínas y los polisacáridos, son descompuestos en sustancias solubles de bajo peso molecular, como aminoácidos y azúcares. Se le conoce como fase de "licuefacción".

2. Los nutrientes orgánicos son convertidos en ácidos grasos de bajo peso molecular en una fase llamada de "fermentación ácida" que baja el pH del sistema (acidogénesis).

3. En la etapa "fermentación del metano" o metanogénica los ácidos orgánicos son convertidos en metano, anhídrido carbónico y una pequeña cantidad de hidrógeno.

Los organismos productores de metano son muy sensibles a las bajas concentraciones de H^+ y si el pH es menor al de su nivel de tolerancia de (aproximadamente 6.2) cesa la producción de metano (10).

En los tratamientos anaerobios la temperatura tiene un papel determinante. Como ejemplo, la digestión fría a una temperatura inferior a $20^{\circ}C$, la digestión mesofílica entre 20 y $40^{\circ}C$ y la termofílica por encima de $40^{\circ}C$ y hasta aproximadamente $55^{\circ}C$. Como las rapideces de conversión aumentan con la temperatura, la digestión en frío requiere de tiempos de retención y residencia más largos que los de la digestión mesofílica que es la más usual (3).

3.4. Diferentes modelos de biodigestores

Los digestores, según su modo de operación se han clasificado en dos tipos:

- De lote (régimen intermitente o "batch")
- De régimen continuo

3.4.1. Digestores de lote (régimen intermitente o "batch")

Estos digestores se cargan de una sola vez en forma total y la descarga se efectúa cuando han dejado de producir combustible.

Consisten en tanques herméticos con una salida de gas conectada a un gasómetro flotante, donde se almacena el biogás.

Se aplican principalmente al tratamiento de desechos altamente perecederos (estiércol con 20 - 25% de materia seca). El sustrato se introduce en el digestor recubierto de aguas residuales. Después de la fermentación (alrededor de 40 días) se extrae la cuba. Generalmente, se usan varios digestores cargados a diferentes tiempos para tener siempre biogás disponible. Otro ejemplo sería cuando el interés principal es la obtención de fertilizante orgánico el cual se requiere en épocas específicas.

Sin embargo, la aplicación de esta tecnología está limitada a las instalaciones pequeñas en países donde no existen fuentes alternas de energía y/o fertilizantes.

3.4.2. Digestores de régimen continuo

Estos digestores, en general, conforman plantas industriales grandes, en las cuales se aplican equipos especiales para alimentar, agitar y suministrar calefacción al sistema. Este tipo de plantas son más bien instalaciones de tipo industrial, donde se genera una gran cantidad de gas.

El sustrato se introduce una o varias veces al día en forma

continúa teniendo como límite la capacidad del digestor. Este procedimiento se emplea para toda clase de desechos fluidos que contengan como máximo 10% de materia seca. Este método en continuo está adaptado del todo a los efluentes. Por lo delicado de su operación, esta técnica demanda una vigilancia continua y un alto nivel tecnológico.

Los inconvenientes que presentan los procesos convencionales, sobre todo los relacionados con altos tiempos de retención, pueden solucionarse en procesos donde el tiempo de residencia hidráulica (TRH) es diferente al tiempo de retención de los sólidos (TRS), que teóricamente es el tiempo que los sólidos permanecen en el reactor y depende del tiempo que requieren los microorganismos para crecer y multiplicarse.

La investigación en el tema de la digestión anaerobia, ha avanzado mucho en el aumento de la eficiencia de generación de biogás y de degradación de la materia orgánica por medio de la reducción de los tiempos de residencia hidráulica requeridos al aumentar los de retención celular con los sistemas de película fija. Entre ellos destacan los lechos empacados y fluidificados y el llamado "UASB" por su nombre en inglés "upflow anaerobic sludge blanpet" que basa su operación en la formación de gránulos anaerobios altamente eficientes.

3.4.2.1. Procedimiento por contacto

El proceso de contacto consiste en un reactor acoplado a un sedimentador secundario. Una parte del licor mezclado se alimenta al sedimentador; en éste, parte del lodo se recircula al tanque de digestión anaerobia y otra se desecha a un lecho de secado.

El objetivo de la recirculación es favorecer el proceso mediante la adición del lodo que contiene microorganismos más adaptados a los requerimientos de los sustratos, así como dar lugar a la agitación de las capas que componen el contenido del reactor, lo cual evita la estratificación cuyos inconvenientes redundan en la reducción de la producción de biogás y en la obtención de un efluente menos claro.

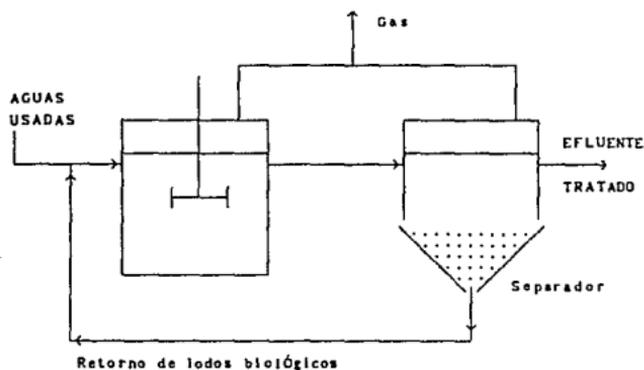


Fig 3.6 Digestor por contacto

El efluente obtenido como resultado del proceso de sedimentación puede pasar o no a otra de tratamiento, lo cual depende de la cantidad de sólidos suspendidos y otras sustancias que puedan ser admisibles en el curso receptor.

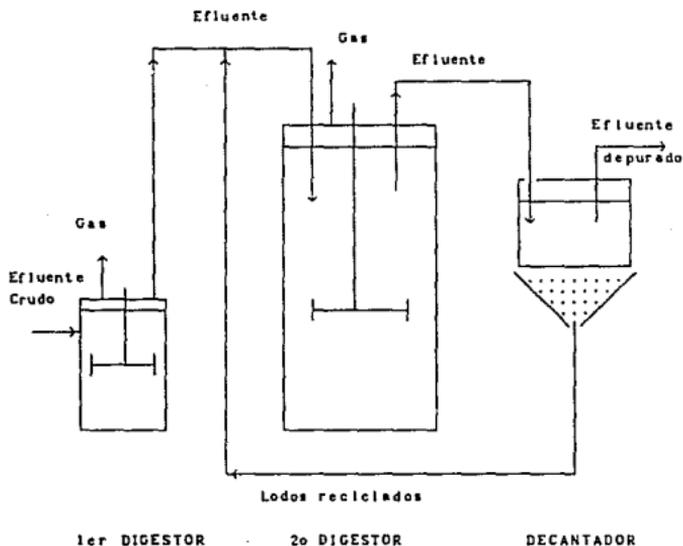


Fig 3.7 Digestor por contacto en dos etapas

Se utiliza principalmente en el laboratorio. Permite la fase acidogénica de la metanogénica en dos digestores distintos. Permite aumentar al máximo la producción de gas y su contenido de metano.

3.4.2.2. El "filtro" o reactor anaerobio empacado

Los primeros en reconocer la necesidad de mantener altos TRS y de esa forma incrementar las cargas orgánicas fueron Young y McCarty, que iniciaron trabajos en este sentido en el año de 1963 y desarrollaron el llamado filtro anaerobio ó reactor de lecho empacado (75).

Este es un sistema constituido por un reactor de flujo ascendente formado por una empaquetadura de piedras o plástico. El proceso de degradación anaerobia se desarrolla una vez que los microorganismos se adhieran al medio (empaquetadura) y el agua residual pasa a través de él, garantizándose de esta forma altos TRS.

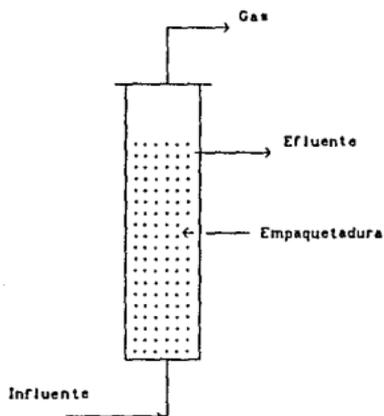


Fig. 3.8 Filtro anaerobio de flujo ascendente

El reactor de lecho empacado se emplea en tratamientos de efluentes residuales líquidos solamente con una concentración de sólidos totales volátiles (STV) menor de 2 000 mg/L. De forma general pueden aplicarse cargas orgánicas entre 0.5 y 12 kg/m³/d de STV.

Este sistema resulta eficiente y se obtiene en el efluente una concentración baja de sólidos suspendidos (6, 9, 57, 72).

3.4.2.3. Reactor de lecho fluidificado (fluidizado)

Otro proceso anaerobio que garantiza altos TRS es el llamado reactor de lecho fluidificado. Este proceso requiere la recirculación con vistas a mantener la velocidad necesaria del fluido para que las partículas del lecho permanezcan en suspensión. Para ello debe garantizarse una velocidad del fluido mayor que la velocidad mínima de fluidificación, pero que sea tal que no provoque el arrastre de las partículas sólidas.

El reactor de lecho fluidificado fue usado primeramente por Lewis y Owens en la desnitrificación de aguas residuales y, posteriormente, por Switzenbaum y Jewell, en el tratamiento de agua residuales, en el que observaron un mejor contacto entre los microorganismos (adheridos al medio y el residual) (60).

Este sistema garantiza un mejor contacto entre los microorganismos y el agua residual a tratar que un digestor clásico (6, 43, 54).

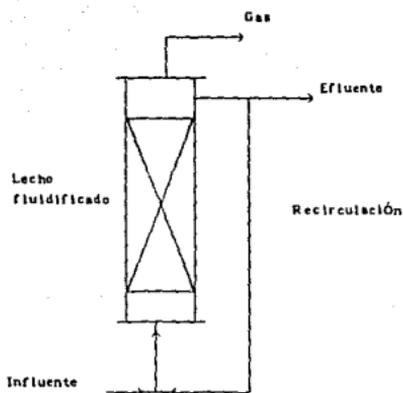


Fig 3.9 Reactor de lecho fluidificado

3.4.2.4. Lecho de lodos de flujo anaerobio

Uno de los nuevos procesos más interesantes es el llamado reactor de manto de lodos que, como ya se dijo, se conoce como "Upflow anaerobic sludge blanket" (UASB), el cual fue desarrollado por Lettinga y colaboradores en Holanda (40).

Este consta de un reactor de flujo ascendente y está equipado con un separador de gas-sólido (GSS). Además, el mezclador mecánico y la recirculación del lodo se mantiene al mínimo con el fin de garantizar su sedimentación.

Se mantiene un alto tiempo de retención de sólidos (TRS) debido a que posee en su parte superior características de un tanque de sedimentación cuando las condiciones físicas y químicas del lodo floculante son favorables.

Una vez que esta condición queda establecida, la retención del lodo depende principalmente de la separación efectiva del gas producido, siendo esta la primera función del GSS.

La segunda función es la de separar las partículas dispersas del lodo, de la solución y retornarlo al compartimento de digestión, el cual se encuentra situado por debajo del GSS.

El proceso "UASB" trabaja a altas cargas orgánicas, obteniéndose altos porcentajes de remoción y bajos TRH. Esto lo hace un método muy prometedor para los efluentes residuales industriales (8, 10, 35, 39, 45, 59).

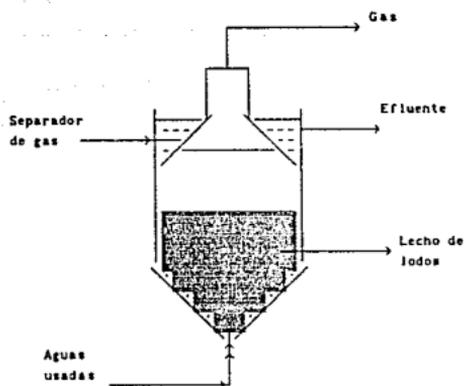


Fig.3.10 Lecho de flujo anaerobio ascendente de lodos.

4. PROBLEMATICA Y ALTERNATIVAS DE SOLUCION PARA MEXICO CASO TIPO: VINAZAS

El desarrollo de la industria azucarera ha atravesado momentos críticos que la han puesto en situaciones difíciles de expansión. Por ello, el Gobierno Federal, durante la década de los setenta, adquirió un gran número de los ingenios del sector privado como una medida de emergencia para preservar y recuperar en la medida de lo posible la capacidad productiva de la industria y atender las necesidades del mercado interno. Las unidades adquiridas fueron de diferentes tamaños y niveles de eficiencia, algunas de ellas con equipos obsoletos y en pésimo estado (77).

La industria azucarera tuvo un repunte a partir de 1983. Entre 1987 y 1988 se tuvo una producción de azúcar de 3,590,097 toneladas (2). Debido a la crisis económica que ha tenido que enfrentar el país, derivada del monto de la deuda externa, a las presiones del FMI y de la escasez de divisas, a partir de 1983, se inició una política de desincorporación de empresas del Gobierno Federal y casi todos los ingenios han sido revendidos al sector privado. Actualmente, sólo dos de los ingenios azucareros pertenecen al Gobierno Federal (sector paracstatal).

La industria azucarera mexicana cuenta actualmente con 66 ingenios distribuidos en 15 estados (fig. 4.1). Los ingenios se localizan en cuatro regiones, estas son:

Región occidente: Sinaloa, Jalisco, Nayarit, Michoacán y Colima.

Región oriente: Tamaulipas, Veracruz, San Luis Potosí, Oaxaca y Colima.

Región centro: Morelos y Puebla.

Región sur este: Campeche, Chiapas y Quintana Roo.



Fig. 4.1 Distribución regional de producción de caña de azúcar

Esta agroindustria enfrenta grandes retos tecnológicos. De ahí que tenga que diversificar los productos derivados del procesamiento de la caña de azúcar. Dentro de estos subproductos se encuentran las mieles incristalizables o finales que pueden ser utilizadas como una fuente energética para la alimentación de

animales poligástricos o como sustrato para la elaboración de alcohol etílico y otros insumos biotecnológicos. En 1987 la producción de alcohol etílico fue de 115 millones de litros y se generaron 1500 millones de litros de vinazas (1.5 millones de metros cúbicos). Este es uno de los efluentes líquidos más contaminantes del proceso. Tiene una alta carga orgánica medida como demanda química de oxígeno (DQO) que va aproximadamente de 70,000 a 150,000 mg por litro y que, comparada con los desagües domésticos (400 a 600 mg por litro) da una idea del impacto ambiental que causan (14, 23, 50).

En México el agua es uno de los recursos cuyo consumo se ha ido incrementando, contra una disponibilidad restringida, ya que actualmente se consume más agua de la que se recibe por precipitación pluvial. Adicionalmente, se atenta contra la pureza de los ríos y los depósitos subterráneos que van deteriorando la calidad de los recursos hídricos. Por otro lado, la demanda del agua se multiplica con el desarrollo industrial, el crecimiento de los asentamientos humanos, los nuevos requerimientos de alimentos, etc y cada una de estas necesidades crean formas de contaminación del agua al no restituirla a su estado original (16). Ya no se puede confiar a los fenómenos de autpurificación la restitución de las condiciones idóneas de calidad del recurso. La contaminación de las aguas plantea graves problemas, tanto por la insuficiencia de nuestros recursos de agua como por la degradación de las condiciones de vida de este medio natural fundamental, lo cual se traduce en profundas modificaciones de la flora y fauna acuáticas y en una serie de trastornos de diversa índole.

A continuación, en la tabla 4.1 se presenta el cuadro con las principales cuencas hidrológicas que han recibido un fuerte impacto de contaminación. En ellas se encuentra el 54% de la carga orgánica del país, 59% de la población, 52% de la superficie bajo riego y 77% del valor bruto de la producción industrial (41).

Como se puede observar la industria azucarera es una de las principales industrias contaminantes de estas cuencas. Lo anterior constituye un grave problema que reclama que los ingenios vengán adoptando acciones tendientes a minimizar estos efectos negativos mediante el adecuado tratamiento de sus aguas residuales, que permitan su reutilización dentro del ingenio, dado que por otra parte el costo del agua se irá incrementado en los próximos años.

4.1. Aprovechamiento de efluentes

La disposición y tratamiento de los subproductos contaminantes en los ingenios considera la reutilización de los mismos, ya que se tiene la gran ventaja de que, en su mayoría, son orgánicos y susceptibles de ser usados y/o transformados. Tal es el caso de la cachaza y vinaza.

A continuación se citan algunos ingenios, en donde se reutilizan los efluentes:

Ingenio Potrero.- Desde hace años las aguas residuales, incluyendo cachaza y vinazas, se incorporan al sistemas de riego.

Ingenio San Miguelito.- Desde hace años se utiliza la cachaza como mejorador de suelos, manejándose en forma sólida y

Tabla 4.1 cuencas de primer orden (41)

Cuenca	Carga orgánica aproximadamente en miles de toneladas de DBO/año	Principales fuentes de contaminación
Pánuco	335	Urbana; industrias químicas, de bebidas alcohólicas, papelería, azucarera, petrolera, alimentaria y textil.
Lerma	135	Urbana; industrias químicas, azucarera, bebidas alcohólicas, petrolera, productos lácteos y alimentaria.
Balsas	92	Urbana; industria azucarera, química y textil.
Río Blanco	60	Urbana; industrias azucareras, papelería y de bebidas alcohólicas.
Guayalejo	60	Urbana e industria textil.
San Juan	60	Urbana; industrias química, papelería, de bebidas alcohólicas, petrolera lácteos y alimentaria.
Cullacán	49	Urbana e industria azucarera.
Fuerte	48	Urbana; industrias azucareras y pesquera.
Coahuayana	26	Urbana; industria azucarera y papelería.
Nazas	16	Urbana; industria química, de bebidas alcohólicas.
Conchos	12	Urbana; industrias papelería, de la curduría y alimentaria; matanza de ganado.

transportándola al campo en camiones de volteo, los agricultores absorben el flete de la cachaza. Este ingenio en la próxima zafra, utilizará las vinazas para riego.

Ingenio Tala.- Actualmente el ingenio desarrolla una investigación en coordinación con el Instituto para el Mejoramiento de la Producción de Azúcar (IMPA), para utilizar las vinazas en riego.

Ingenio Tres Valles.- En la próxima zafra, operará una planta tipo para la reutilización de las aguas residuales en riego. Otros ingenios vienen analizando la conveniencia de instalar plantas similares, como es el de Alvaro Obregon en Quintana Roo.

Ingenio Santa Clara.- Tiene operando a nivel piloto, una planta concentradora de vinazas para su utilización como alimento animal.

Ingenio Alianza Popular.- Tiene operando a nivel piloto, una planta para la producción de biogás y la obtención de proteína microbiana. Un análisis económico preliminar indica que el sistema de tratamiento de las vinazas podría ser autofinanciable en la medida en que se hiciera uso de los subproductos generados durante este tratamiento (23, 49).

4.2. Tratamiento biológico de las vinazas

En este proyecto, se estudiaron tres sistemas anaerobios y uno aerobio a escala piloto. En la primera fase del proyecto se trabajó en forma independiente, con el objeto de evaluar su

producción y eficiencia depuradora. En la segunda fase se han conectado los reactores anaerobios en serie con el reactor aerobio.

Los sistemas anaerobios son los siguientes:

-Un reactor de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB).

-Tres reactores de lecho empacado o filtros anaerobios, tanto de flujo ascendente como descendente.

-Un reactor anaerobio de lecho fluidificado (Ranlef).

-Los primeros dos reactores pertenecen al Instituto de Ingeniería de la UNAM y el tercer tipo de reactor al Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN (Cinvestav), Zacatenco.

Para el sistema aerobio:

- Un reactor biológico rotatorio (RBR) o reactor de discos biológicos.

- Un reactor aerobio de lecho fluidificado (Ralef).

Que pertenecen a la Facultad de Química de la UNAM y el Cinvestav; Zacatenco respectivamente.

Estos sistemas ya han sido usados en una primera etapa para la remoción de la materia orgánica presente en las vinazas, obteniéndose una remoción de aproximadamente el 70% de la materia orgánica, medida como demanda química de oxígeno (DQO) para los sistemas anaerobio y de un 40 a un 60% de materia orgánica medida como DQO para el sistema aerobio.

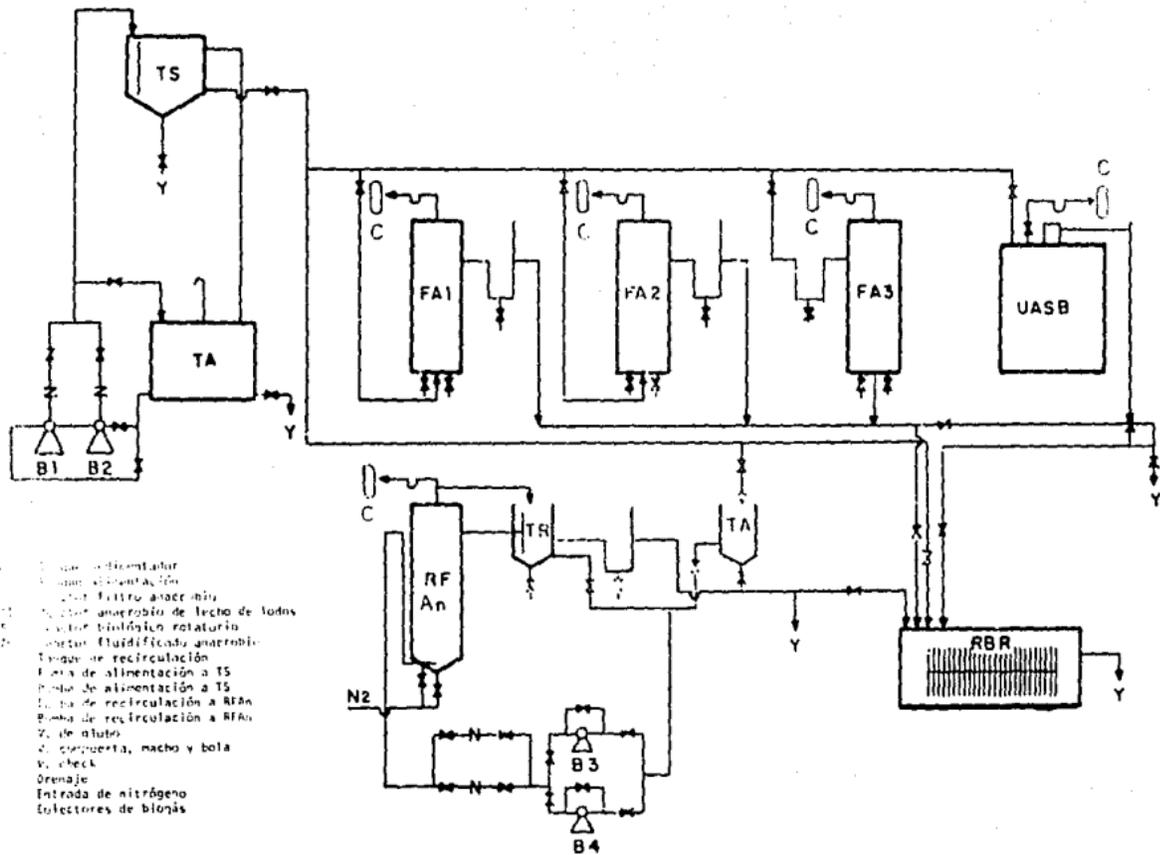
Por esto, en la segunda fase se verificó su efectividad al conectarse en serie los sistemas anaerobios con el reactor (RBR), con el fin de estudiar no sólo el tratamiento anaerobio y aerobio

de las vinazas por separado sino con el objetivo específico de estudiar la posible generación de biogás y biomasa microbiana y su uso potencial para dar valor agregado al sistema de tratamiento (28).

El reactor biológico rotatorio (RBR) ya ha sido utilizado anteriormente para realizar estudios con aguas residuales generadas por molinos de nixtamal y fábricas de harina de maíz nixtamalizado. Estas aguas, conocidas como nejayote han permitido obtener biomasa microbiana con un contenido de nitrógeno equivalente a un 20% de proteína en base seca que ha sido empleado como alimento de peces (15, 20, 22, 24).

La planta piloto de tratamiento biológico usada hasta el momento para vinaza se localiza en el Ingenio Alianza Popular, en Tambaca, municipio de Tamasopo, San Luis Potosí.

En la Fig (4.2) se presenta un diagrama esquemático de la planta piloto. La vinaza sale del sistema de destilación a una temperatura aproximada de 80°C y con un pH de 3 a 5 para ser llevada hacia la planta piloto por medio de camiones pipa. En ocasiones se neutraliza con cal para aumentar su pH a un valor de 6 a 6.5, aunque esto no es deseable si se quiere usar la biomasa generada como complemento alimenticio (20). Se llena un tanque de almacenamiento de 1.7 m^3 y, a través de bombas centrífugas de 1/2 HP, se lleva a la vinaza a un tanque sedimentador primario de 6 m^3 que se encuentra a una altura de 5 m. Una vez que la vinaza se encuentra en el sedimentador, es llevada por gravedad mediante una red de tuberías hacia cada uno de los reactores anaerobios.



- TS Tanco sedimentador
- TA Tanque aerobio
- FA1 Filtro anaerobio
- FA2 Filtro anaerobio de lecho de fondo
- FA3 Filtro biológico rotatorio anaerobio
- UASB Unidad anaerobia de suspensión de biomasa
- RF An Reactor biológico rotatorio anaerobio
- TR Tanque de recirculación
- B1 Bomba de alimentación a TS
- B2 Bomba de alimentación a TA
- B3 Bomba de recirculación a RF An
- B4 Bomba de recirculación a RBR
- N2 Ingreso de nitrógeno
- C Válvula de compuerta, macho y bola
- Y Válvula de check
- Y Drenaje
- N2 Entrada de nitrógeno
- C Colectores de biomasas

Durante este lapso, la temperatura de las vinazas ha disminuido hasta 35°C que es la temperatura a la que operan estos reactores. Los efluentes anaerobios pretratados se envían al reactor de biodiscos y al fluidificado aerobio para su tratamiento biológico final. Los gastos de alimentación se controlan mediante válvulas de globo. Los volúmenes de trabajo de cada uno de los sistemas anaerobios son de 5 000 litros para el de manto de lodos, de 300 litros para el de lecho fluidificado y de 294 para cada uno de los de lecho empacado. El sistema aerobio de biodiscos tiene un volumen de trabajo de 3 000 litros y el fluidificado 25 litros. La vinaza, una vez tratada, se evacúa hacia el drenaje de la planta (50).

4.2.1. Caracterización de la vinaza

La composición de las vinazas varía dependiendo de la materia prima utilizada durante la fermentación así como la destilación. En el ingenio Alianza Popular, por ejemplo, la levadura muerta no es separada del mosto fermentado (ó vino) antes de enviarse a las torres de destilación, lo que aumenta la carga orgánica de las aguas residuales.

La materia orgánica fue medida como demanda química y bioquímica de oxígeno (DQO y DBO), pH, temperatura, alcalinidad, turbiedad, sólidos totales, suspendidos y disueltos (65).

4.2.2. Equipo

4.2.2.1. Reactor aerobio de biodiscos de 3000 litros

El reactor biológico rotatorio (RBR) o de biodiscos consta de cuatro cámaras y cada una de ellas posee 18 discos de poliuretano montados sobre una flecha que permite su rotación. El 40% del área superficial de los discos se encuentra sumergida en el agua residual (vinazas). El reactor es un sistema comercial construido por la firma Stengelín de la RFA.

Una descripción más amplia sobre su construcción y su funcionamiento se presentan en la literatura (23, 24). Las características del reactor se describen en la tabla(4.2).

Características	Unidades
Cámaras	4
Discos de cámara	18
Diámetro de los discos	2 m
Espesor de los discos	10 mm
Área superficial de los discos	454 m ²
Volumen total de trabajo	3 m ³
Relación área volumen	152 m ² /m ³
Velocidad rotacional	2 min ⁻¹

Tabla 4.2 Características del reactor de discos rotatorio

4.2.2.2. Reactor de lecho fluidificado anaerobio (fluidizado)

Este reactor es una columna esbelta de 0.3 m de diámetro y 4.0 m de altura con un volumen total de 0.3 m^3 . Tiene una cámara de expansión en la parte superior para controlar la elutriación o pérdida de sólidos en suspensión por arrastre. El medio granular de soporte son esférulas de 700 micras de resina gastada proveniente de un sistema de suavización de aguas para calderas. Contiene 0.08 m^3 de volumen de lecho en reposo cuya expansión se controló para alcanzar un volumen de lecho en fluidificación de 0.12 m^3 .

Es un reactor isotérmico, que trabaja entre 30 y 37°C cuyo calor es proveído por resistencias eléctricas con control manual. La recirculación continua para fluidificar el lecho es llevada a cabo por una bomba centrífuga que introduce al efluente por la parte inferior del reactor. El biogás generado y el efluente tratado son colectados por la parte superior, enviando el biogás a un tambor de agua, para medir el volumen generado por desplazamiento.

La descripción sobre el arranque y operación de este reactor se presenta en la literatura (23).

4.2.2.3. Reactores de lecho empacado

Como se mencionó anteriormente, la planta cuenta con tres reactores de este tipo formados por un tubo de acero de 50 cm de diámetro y 2 m de altura. Los extremos están sellados con tapas bridadas del mismo material. La tapa inferior tiene tres orificios, dos de purga y uno de ellos para alimentación o evacuación. La tapa superior tiene un orificio para la salida del gas producida en el reactor. A lo largo de éste, se encuentran cinco puntos de muestreo separados 25 cm entre sí y uno de evacuación del efluente a 30 cm.

El material empleado en los filtros como empaque o soporte para la biopelícula son anillos de plástico tipo pall (Hydronyl Hy-Contact) de 9 cm de diámetro y de altura. Los anillos reposan sobre una rejilla de tipo Irving colocados a 20 cm del fondo del reactor. El número de anillos utilizados en cada reactor es de 374. Cada reactor tiene un volumen total de 394 L, un volumen del líquido sin empaque de 294 L (altura útil) y un volumen útil de 272 L. Cuenta con 23 m^2 de superficie de soporte, con una relación área/volumen de $76 \text{ m}^2/\text{m}^3$ para la parte empacada y un coeficiente de vacío de 0.93. En un inicio los tres reactores fueron construídos para operar en flujo ascendente pero uno de los reactores fue modificado para convertirlo a flujo descendente.

La operación de estos reactores así como su arranque se presenta en la literatura mencionada (48).

4.2.2.4. Reactor de manto de lodos piloto

Está construido de un tanque comercial de polietileno de baja densidad marca Rotoplas de 5 m³ de volumen. El recipiente tiene una altura de 2.45 m y un diámetro en la parte inferior de 1.71 m y de 1.93 m en la parte superior. En la zona de sedimentación y recuperación de gas tiene un sistema de separación líquido-sólido-gas que es un tanque de polietileno de baja densidad de 100 L de volumen. Con el fin de evitar la salida del gas por estazona, el reactor está aislado con lana mineral recubierta con malla de alambre y cemento monolítico, pintado con un producto impermeabilizante.

4.2.2.4.1. Reactor de manto de lodos a escala de banco

Es un recipiente de polietileno de alta densidad de 120 L de volumen y con una tapa hermética. El recipiente tiene una altura de 77 cm y un diámetro de 45 cm en su parte superior. En la tapa de reactor cuenta con una tubería hidráulica de PVC para la alimentación del agua residual (vinaza), la evacuación del agua tratada, así como la salida del gas producido, tiene además un separador de líquido-sólido-gas, de PVC sanitario de 4 pulgadas de diámetro.

El arranque y la operación de estos reactores se encuentra en la literatura (49, 50).

4.2.3. Resultados y discusión

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los experimentos realizados en un período de siete meses ininterrumpidos de funcionamiento de la planta piloto.

Parámetro	Vinazas		
	Frescas	Almacenadas	Diluida
Temperature, C	25 - 35	25 - 30	15 - 20
pH	4.2 - 7.0	4.5 - 5.5	4.8 - 5.5
Alcalinidad, g CaCO ₃ /L	5.8	9.0	2.95
Turbiedad NTU	30000	30000	3100
Sólidos totales, g/L	69 - 90	47 - 70	13 - 17
Sólidos volátiles totales, g/L	65.1	--	--
Sólidos fijos totales, g/L	24.5	--	--
Sólidos volátiles suspendido, g/L	2.6	--	--
Sólidos fijos suspendidos, g/L	1.0	--	--
DBO, mg ₂ O /L	31500	27500	1960
DQO, mg ₂ O /L	69 - 128	64 - 120	4.9
Nitrógeno Kjeldhal, g N/L	1.2 - 1.6	1.0 - 1.3	--
Nitrógeno amoniacal g N/L	0.11 - 0.15	0.5	--
Íones sulfato, g/L	3.1 - 5.8	2.8 - 3.5	--
Íones sulfito, g/L	1.2	--	--
Íones potasio, g/L	8.1	--	--
Íón sodio, g/L	0.14	--	--

Dilución de 1/100

Dilución de 1/5

Tabla 4.3 Análisis de vinazas (lotes frescos, almacenados y diluidos)

4.2.3.1. Reactor aerobio de biodiscos

Los sistemas aerobios degradan efluentes orgánicos ricos en carbohidratos, aunque su eficiencia se reduce a medida que la concentración inicial de materia orgánica se incrementa sin aumentar el flujo de oxígeno disponible.

Como puede apreciarse en los resultados obtenidos, la carga orgánica decrece en forma considerable, teniendo en cuenta que el sistema no es tan eficiente a altas cargas de concentración de materia orgánica. La cantidad de materia orgánica que es metabolizada por microorganismos puede obtenerse en la prueba de la DBO_5 (50 - 65%) y la que es químicamente oxidada en la prueba de la DQO (55 - 75%). Estos datos indican que existen compuestos solubles en las vinazas que no pueden eliminarse por métodos biológicos.

Esto ya había sido observado en los experimentos a escala de laboratorio donde se tenía una eficiencia de remoción de DQO de 68% y una de DBO_5 de 95%. Con base en estos resultados se recomienda que el siguiente paso sea la purificación final en un sistema de absorción de la materia orgánica remanente (principalmente humatos) para así poder optimizar la operación de la planta piloto y alcanzar una eficiencia de depuración total de 99% (26).

Parámetro	Vinazas	
	tratadas	remoción
Temperatura	25 - 30	
pH	6.9 - 8.1	
Alcalinidad	700 - 900	
Turbiedad, NTU	3000 - 6000	
Sólidos totales, mg/L	7000 - 9000	
DBO ₅ , mgO/L	1500 - 3000	50 - 65%
DQO, mgO/L	5000 - 1000	55 - 75%

*Dilución de 1/100

Tabla 4.4 Análisis promedio de la vinazas después del tratamiento en un reactor de biodiscos

4.2.3.1.1. Caracterización de la biomasa

Para conocer el valor nutritivo potencial de la biomasa obtenida, se hicieron análisis bromatológicos de muestras representativas, así como de metales pesados y un aminograma de su proteína. En las tablas 4.5 y 4.6 se presentan los valores promedio de los análisis efectuados a estas muestra (14, 24, 26).

La cantidad de nitrógeno medido como proteína cruda ofrece la posibilidad de uso como fuente proteica en dietas en animales mono y poligástricos, así como de peces. El contenido de cenizas es alto, debido a la presencia de carbonato de calcio ocluido en la biomasa. Esto puede ser un factor crucial para su uso en alimentos balanceados ya que para el caso de la biomasa obtenida del

Tabla 4.5 Análisis proximal de la biomasa del RBR y aminograma de su proteína (en paréntesis los valores recomendados por la FAO^x para animales monogástricos).

Composición	Por ciento (base seca)
Proteína cruda (factor, 6.25) [*]	27.7
Cenizas	26.6
Fibra cruda	0
Extracto etéreo	14.4
(Nitrógeno amoniacal)	1.5
Extracto libre de nitrógeno	31.3

aminoácidos esenciales*

(g/100g proteína)

Lisina	4.43	(4.00)
Treonina	4.22	(2.80)
Isoleucina	4.20	(4.20)
Leucina	6.73	(4.80)
Valina	5.44	(4.20)
Metionina**	1.81	(2.20)
Fenilalanina	3.74	(2.80)

x Estándar FAO: "Protein from Hydrocarbons" Editor H. Gounelle de Pontanel. Ed. Academic Press (1972).

• Análisis realizados por el Laboratorio de Calidad de Proteína, CIMMYT, El Batán, Méx.

** Parcialmente destruída durante la hidrólisis analítica.

tratamiento del nejayote (agua de cocción del maíz por métodos alcalinos), la presencia excesiva de carbonato de calcio aparentemente crea problemas de asimilación a las ratas de prueba a las que se suministró (21, 22).

Metales	Vinazas	Biomasa	Nivel crítico
Pb	0.45	12	(0.35)
Zn	4.05	3575	(4000*)
Co	0.98	8.0	(100)
Cd	0.3	---	(0.5)
Mn	7.8	---	(1000)

Tabla 4.6 Contenido de metales en vinazas y biomasa del RBR, en mg/L

* En general las diferentes especies animales muestran una gran tolerancia al consumo de grandes cantidades de Zn. Aún por arriba del valor indicado (4000), el cambio más significativo es la disminución de ingestión voluntaria sin llegar a causar intoxicación en el animal.

Debido al pH bajo inicial y a que el reactor no ha sido pintado interiormente desde hace cuatro años existe la posibilidad de una solubilización de los metales que componen la tina del reactor, dado que las vinazas de las que proviene la biomasa, no contienen esas concentraciones de los metales analizados (14).

4.2.3.2. Reactor de lecho fluidificado (fluidizado)

La operación del reactor fue estudiada a tres diferentes tiempos de residencia hidráulica (4, 3 y 2 días basados en el volumen de lecho fluidificado).

Los resultados obtenidos en este experimento se presentan en la tabla (4.7).

Durante todos los tiempos de residencia estudiados, al llegar al régimen pseudopermanente se alcanzó también el metanogénico sin ningún disturbio acidogénico. Se obtuvo una eficiencia de remoción de casi un 70% del material orgánico, medido como DQO, para un tiempo de residencia de 2 días con una producción de gas de 7 m^3 (condiciones estándar de P y T) por cada m^3 de volumen del lecho por día con un contenido de metano de 70 a 80% en volumen.

Solamente el grupo de Calzada y colaboradores (10) con un reactor híbrido de manto de lodos alcanzó cargas de operación tan altas como las de este trabajo, pero su eficiencia de remoción de materia orgánica fue marginal (menos de la mitad de la correspondiente a estos experimentos).

El reactor de lecho fluidificado, empleando el mismo tipo de efluente, supera en intensidad el proceso del filtro anaerobio de Van der Berg y Kennedy (72), al filtro anaerobio de Borjes y colaboradores (6) y al de Szandrey (67), siendo las eficiencias de remoción de contaminantes del mismo orden de magnitud.

La producción de gas por este proceso resulta atractivo, tanto por su volumen como por su composición ya que éste podría

Tabla 4.7 Resultados obtenidos del tratamiento de lecho

fluidificado (LF) a régimen pseudopermanente

Flujo de influente L/d	30	40	60
Recirculación, L/d	6.7	5.8	6.0
Velocidad ascendente, m/h	5.7	4.9	5.1
Tiempo de residencia hidráulica, d			
(1)	10.0	7.5	5.0
(2)	4	3	2
Carga orgánica volumétrica, kg DQO/m ³			
(1)	7.9	7.8	13.5
(2)	19.7	19.3	33.9
Demanda química de oxígeno, mg/d			
influyente	78941	58820	67731
efluente	26032	17660	22802
Eficiencia remoción, % pH			
influyente	5.0	5.17	5.33
efluente	7.3	7.35	7.34
Alcalinidad total, mg CaCO ₃ /L (3)			
influyente	8840	9391	10500
efluente	4910	4933	5359
Alcalinidad intermedia/parcial, mg CaCO ₃ /L (4)			
efluente	0.90	0.82	0.95
Acidos orgánicos volátiles, mg ácido acético/L			
influyente	---	18063	19646
efluente	---	7712	5126
Producción biogás, m (SPT)/d (5)	0.58	0.66	0.85
DQO removido	0.40	0.40	0.32
Producción volumétrica de biogás, m ³ (PTN)/m ³ d			
(1)	1.91	2.21	2.83
(2)	4.83	5.52	7.10
Composición de biogás			
%CO ₂	---	21.80	28.00
xCH ₄ + otros	---	78.20	72.00
Flamabilidad	+	+	+

(1) Basado en un volumen del reactor

(2) Basado en un volumen del lecho fluidificado

(3) Alcalinidad media hasta pH final de 5.8

(4) Alcalinidad media entre pH 5.8 y 4.3

(5) Valores corregidos a 0°C, 1 atm y para una humedad relativa promedio de 50%

ser usado en el ingenio para generar vapor u otros requerimientos energéticos. Este sistema anaerobio puede incrementar aún su tasa de carga, ya que no se ha alcanzado todavía la máxima capacidad de operación.

4.2.3.3. Reactores de lecho empacado (LE) y manto de lodos (ML)

Los resultados obtenidos en los diferentes sistemas anerobios indican que la degradación de la materia orgánica promedio alcanzada es muy similar en los cuatro reactores (68 - 72%) en relación a la DQO. El contenido de metano varía de 40 a 50% del volumen total de biogás producido (24).

Sánchez Riera y colaboradores trabajan con un reactor de manto de lodos de 0.0110 m^3 a 40°C con vinazas similares a las del presente estudio pero diluídas al 50%. Bajo tales condiciones, alcanzaron 71% de eficiencia en la remoción de DQO con 2 días de tiempo de residencia hidráulica (TRH) y $23.3 \text{ kg DQO/m}^3\text{d}$ de carga orgánica.

Craveiro y colaboradores trataron vinazas de la fermentación directa de jugo de caña, con un reactor de manto de lodos a escala de planta piloto de 11 m^3 . Carrondo y colaboradores emplearon dos filtros anaerobios de 0.12 m (35 y $44 \text{ m}^2/\text{m}^3$ de relación área/volumen de reactor) en el tratamiento de vinazas bajo diferentes condiciones de operación y temperatura ambiente. A 2.5 días de TRH y $12 \text{ kg DQO/m}^3\text{d}$ se obtuvo una remoción de 57% DQO (18, 19).

Tabla 4.8 Resultados promedio de la operación de los tres reactores empacados y el de manto de lodos con un tiempo de residencia de 2.5 días, una carga orgánica de 36 Kg DQO/m d y una temperatura de 28°C.

Características	REACTOR				
	Infl.	lecho empacado			manto de lodos
		I	II	III	
Alcalinidad	2.2	6.5	7.6	7.8	8.6
Sólidos					
Totales	88.0	75.0	65.7	64.0	66.6
Volátiles	58.1	39.4	37.3	35.7	31.1
Fijos	29.9	35.6	28.4	28.3	35.5
DQO _t	69.3	22.4	20.6	18.8	19.7
% Remoción					
DQO	--	60.0	70.0	73.0	72.0
pH	5.0	7.4	7.6	7.6	7.4
Producción de gas					
L/d	--	372	385	327	113
L/Ld*	--	1.26	1.31	1.11	0.94

Concentraciones en g/L, excepto alcalinidad en g CaCO₃/L

* Litros de gas por litro de volumen de reactor y por día

Puede decirse que los resultados obtenidos en estos reactores comparados con los comunicados en la literatura (7,9,10,12,39,40) permiten verificar que los reactores operan satisfactoriamente, tomando en cuenta la alta carga orgánica a la cual son alimentados (36 kg DQO/m³d) así como el elevado contenido en sulfatos y el hecho de alimentar vinazas puras no neutralizadas.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En las condiciones actuales del país, crisis económica y venta a la iniciativa privada de los ingenios, es difícil predecir cuál será el futuro de estos proyectos, aún cuando demuestren una factibilidad económica. Esta incertidumbre se extiende al futuro de la propia industria azucarera por la aparición en el mercado de nuevos productos con mayor capacidad edulcorante. Sin embargo, esta agroindustria es de gran importancia para México, porque existe una tradición y amplio conocimiento de ella y por el impacto socio-económico que representa.

Por ello, la biotecnología y la química tienen grandes perspectivas para aprovechar todas las posibilidades del procesamiento de la caña así como la de sus subproductos, los cuales representan un grave problema ecológico. La disposición y el tratamiento de los subproductos contaminantes en los ingenios consideran la reutilización de los mismos, ya que se tiene la ventaja de que son orgánicos en su mayoría y son susceptibles de ser usados y/o transformados. Tal es el caso de la vinaza que, a través de un proceso biológico puede transformarse en biogás, proteína microbiana y agua tratada. Esto indica que la tecnología puede servir para reaprovechar los subproductos generados durante cualquier proceso.

Tratándose de la industria azucarera, se puede decir que en los últimos años se ha logrado avanzar en este aspecto y, en la actualidad existe un mayor convencimiento por parte de los

ingenios sobre la importancia de la preservación del medio ambiente y la conservación de los recursos de las zonas aledañas.

La acción conjunta, el esfuerzo comunitario y particularmente el sentido de solidaridad de las instituciones de educación superior y de investigación con las empresas paraestatales, habrán de producir los mejores efectos para que los recursos de la naturaleza afectados puedan recuperarse y así las generaciones venideras, logren una mayor libertad, seguridad y bienestar mediante la aceptación de una responsabilidad que sirva para enriquecer el patrimonio de todos.

6. Bibliografía.

- 1.- Alvarez, A., Escárcega, C. Pulido, R. y Durán de Bazúa, C. (1985). Diseño, construcción y puesta en marcha de un reactor biológico rotatorio para el tratamiento de las aguas residuales. En Proc. VI Encuentro AMIDIQ, Pub. UAM-I. México, D.F.
- 2.- Azúcar, S.A. (1986). Desarrollo operativo 1980-1986. Pub. Azúcar, S.A. de C.V. México, D.F.
- 3.- Balch, W.E., Schobert, R.S., Tanner, S. y Wolfe, R.S. (1977). *Acetobacterium*, a new genus of hydrogen-oxidizing, carbon-dioxide-reducing, anaerobic bacteria. *Int. J. Syst. Bacteriol.*, 27:355-361.
- 4.- Bassols, B.A. (1986). Recursos Naturales de México. Ed. Nuestro Tiempo. México, D.F. Pp 128-166.
- 5.- Bettencourt, V.C., Figuerido, A.M., Paixao, A.C. y Poll, D.M. (1978). Composición de la vinaza. *Brasil-Azucarero*. Año XLVI, vol. XCII, Oct. 4:25-36.
- 6.- Borles, A., Raynal, J. y Bazile, F. (1988). Anaerobic digestion of high-strength distillery wastewater (cane-molasses stillage) in a fixed-film reactor. *Biol. Wastes*, 23:261-267.
- 7.- Briones, M.R. y Rodriguez, B.D. (1988). Tratamiento del agua residual de la UAM-Iztapalapa con un reactor de lecho (UASB), a nivel laboratorio y planta piloto. Reporte de servicio social. UAM-I. México D.F.

- 8.- Cail, R.G. y Barford, J.P. (1985). The development of granulation in an upflow floc digester and upflow anaerobic sludge blanket digester treating cane juice. *Biotechnol. Letters*, 7(7):493-498.
- 9.- Cail, R.G. y Bartord, J.P. (1985). A comparison of an upflow floc (tower) digester and UASB system treating cane juice stillage. *Agric. Wastes*, 14:292-299.
- 10.- Calzada, J.F., Rolz, C., Arriola, M.C., Porres, C. y Valladares, J. (1988). Methanogenic bioconversion of liquid agroindustrial wastes in a two-section reactor. En *Proc. 5th Intl. Symp. on Anaerobic Digestion*, Bologna, Italia. Pp. 125-132.
11. Cano, V. (1982). Infraestructura de agua potable alcantarillado en México. Presentado en Simposio sobre tratamiento y reuso de Aguas Residuales Municipales e Industriales. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (SMISA), México, D.F.
- 12.- Carbajal, C. (1981). Problemas de la contaminación ambiental que causan los ingenios azucareros y sugerencias para empezar a resolverlos. Presentado en XI Convención Nacional de Asociación de Técnicos Azucareros de México. México D.F.
- 13.- Cerro, J. (1983). Aspectos económicos de la actualidad azucarera mundial. Presentado en Foro sobre Desarrollo Perspectivo de la Agro-Industria Azucarera, La Habana, Cuba.

14.- Castro-Villela, J. M. y Villegas, R. Obtención de proteína microbiana empleando como sustrato vinazas de Ingenios azucareros-alcoholeros. Tesis profesional. Facultad de Química, UASLP. San Luis Potosí, SLP, México.

15.- Civit, E., Durán de Bazúa, C., Engelmann, G., González, S. y Hartmann, L. (1984). Anaerobic treatment of maize processing wastewater (nejayote) in a packed-bed reactor cascade.

16.- Chanlett, E.T. (1976). La protección del medio ambiente. Ed. Mc Graw-Hill Book Company, Pp. 188-200.

17.- COPERSUCAR. (1979). Aproveitamento de vinhaca. Viabilidade técnico económica. Asesoría del Directorio y Centro de Tecnología, San Paulo-SP, Brasil Pp 71.

18.- Carrondo, M.J.T., Silva, J.M.C., Figuerira, M.I.I., Ganho, R.M.B., y Oliveira, J.F.S. (1983). Anaerobic filter treatment of molasses fermentation wastewaters. Water Sci., Technol., Pp. 8-9, 15, 117-126.

19.- Craveiro, A.M., Soares, H.M. y Schamidell, W. (1986). Technical aspects and cost estimations for anaerobic systems treating vinasse and brewery/soft drink wastewaters. Wat. Sci. Technol., 18(12), 123-134.

20.- Durán de Bazúa, C. (1986). Effluents of the food industry in México: Environmental impacts on soil and water resources and posible solutions using the biotechnological approach. Case problem: the corn industry. "Biotechnology Applied to Enviromental Problems". D.L. Wise, Editor. CRC Press Inc. Boca Ratón, FA, EE.UU. de A.

21.- Durán de Bazúa, C. (1986). Informe final del programa de cooperación MICONSA-FACULTAD, Pub. Fac. de Química, UNAM, México, D.F.

22.- Durán de Bazúa, C. (1981). Disertación doctoral, versión en español. Tratamiento de los efluentes en la industria del maíz en México. Pub. Fac. de Química, UNAM, México, D.F.

23.- Durán de Bazúa, C.,González, S., Medellín, P., Noyola, A., Poggi-Varaldo, H. y Zedillo, L.E. (1990). Retos a la industria azucarera para la próxima década: Reaprovechamiento de las aguas residuales a través de su degradación biológica para obtener biogás y biomasa microbiana. Memorias del XVI Congreso. Academia Nacional de Ingeniería, A.C. México, D.F.

24.- Durán de Bazúa, C., Medellín, P., Noyola, A., Poggi-Varaldo, H.M. y Zedillo, L.E. Tecnología, Ciencia Ed. (IMIQ), 3(2):33-43.

25.- Durán de Bazúa, C., Poggi-Varaldo, H.M., Medellín, P. (1988). Utilización de recursos renovable en la producción de energeticos secundarios y fuentes alternas de alimento. Informe de avance del proyecto. México, D.F. Conacyt-UNAM-IPN-UASLP.

- 26.- Durán de Bazúa, C., Noyola, A. Poggi, H. y Zedillo, L. (1991). Biodegradation of process industry wastewater. Case problem: Sugar cane industry. En "Biological Degratation of Waster", Ed. A.M.M. Martin. Sci. Pub. Ltd. Londres Inglaterra.
- 27.- Estadísticas azucareras (1988). Pub. Azúcar, S.A. de C.V. México D.F.
- 28.- García-Díaz, G. y Durán de Bazúa, C. (1988). Informe UNAM-IPN-UASLP-AZUCAR, VIN-01-88. Pub. Facultad de Química UNAM, México, D.F.
- 29.- GEPLACEA (1989). Análisis técnico de los mercados futuros. Serie, Tecnología, México, D.F. Pp. 7-67.
- 30.- GEPLACEA (1984). El mercado internacional del azúcar. Serie Mercado y Estadística, México, D.F. Pp. 13-39.
- 31.- GEPLACEA (1986). La agroindustria de la caña de azúcar en América Latina y el Caribe. Programa de difusión, México. D.F. Pp.13-121.
- 32.- GEPLACEA (1989). La melaza como recurso alimenticio para producción animal. Serie Diversificación, México, D.F. Pp. 17-23
- 33.- GEPLACEA (1990). Manual de los derivados de la caña de azúcar. Serie Diversificación, México, D.F. Pp 19-20, 39-46, 427-440.
- 34.- GEPLACEA (1988). Subproductos y derivados de la agroindustria azucarera. Serie Diversificación, México, D.F. Pp 11-17, 349-367.

- 35.- Guldebook in biogas development, United Nations Energy Resources Development. Serie No 21 New York, pp 19-80.
- 36.- Herman, A.G.. (1989). Fermentación alcohólica. Col. GEPLACEA, Serie Diversificación, México, D.F. Pp. 11-25.
- 37.- Kastner, F. (1965) Listy Cukrarnicke. Abril, vol. 4. Pub ICIDCA. La Habana Cuba.
- 38.- IMPA (1984). Informe técnico. Azúcar, S.A. de C.V. México D.F.
- 39.- Lettinga, G. (1980). Anaerobic treatment for wastewater treatment and energy production. En Inter-American Seminar on Biogas, Nov. 1981, Joao Pessoa, Brasil.
- 40.- Lettinga, G., Van Velsen, A.F. Hobma, S.B., de Zeew, W. y Klapwijk, A. (1980). Use of upflow sludge blanket (UASB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. Biotechnol. 22:699-734.
- 41.- López, P. y Ramos, M. (1982). El medio ambiente en México. Ed. Fondo. Cult. Econ. México D.F.
- 42.- Luna-Pabello, V.M. (1987). Estudio de los protozoarios ciliados presentes en un sistema de tratamiento por medio de biodiscos. Tesis profesional. UNAM, México, D.F.
- 43.- Maier, W.J. (1966). Mass transfer and growth kinetics on a slime layer. A simulation of the trickling filter. Ph. D. Thesis, Cornell University, New York. EE.UU. de A.

- 44.- Mc Carty, P.L. (1964). Anaerobic waste treatment fundamentals. Pub. Works (95): 9, 107-112; 10, 123-126; 11, 91-94; 12, 95-99.
- 45.- Mc Kinney, R.E. (1962). Microbiology for Sanitary Engineers. Ed. Mc Graw Hill, Ney York. EE.UU. de A.
- 46.- Montesinos, M.A. y Durán de Bazúa, C. (1986). Estudio dinámico de un reactor biológico rotatorio en la producción de proteína microbiana. Presentado en el XVI Congreso de la ATAM. Cholula, Puebla, México.
- 47.- Noa-Silverio, H. (1987). La utilización de los subproductos y productos de la industria azucarera en la alimentación animal. Col. GEPLACEA, Serie Diversificación, México, D.F.
- 48.- Noyola, A. (1986). La digestión anaeróbica aplicada al tratamiento de aguas residuales a nivel individual y semicolectivo. Presentado en el V Congreso Nacional de la Sociedad de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, A.C. Puebla, Puebla. México.
- 49.- Noyola, A. y Briones, R. (1988). Tratamiento anaerobio de vinazas a escala piloto: inoculación y arranque de reactores tipo lecho de lodos y filtro anaerobio. Memorias del VI Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, A.C. Querétaro, Qro., México.
- 50.- Noyola, A., Briones, R. y Jiménez, C. (1989). Tratamiento anaerobio de vinazas a nivel planta piloto con dos tipos de reactores avanzados. Proyectos No. 8335 y 9341. Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D.F.

- 51.-Obayashi, A.W., Stensel, H.D. y Kominek, E. (1981). Anaerobic treatment of high-strength wastes. CEP, April, Pp. 68-73.
- 52.- Pedroza de Brenes, R., Durán de Bazúa, C. y González, S. (1984). Degradación biológica aerobia de las aguas de desecho provenientes de la industria nixtamalizadora en un reactor biológico rotatorio. Informe 3303 CONASUPO-Instituto de Ingeniería, UNAM, D.F.
- 53.- Pedroza de Brenes, R. y Durán de Bazúa, C. (1985). Producción de proteína unicelular de desecho a partir de efluentes de la industrialización del maíz para consumo humano. Tecnol. Aliment. (Méx), 20(6):3-11.
- 54.- Poepel, F. Estimating, construction and output of immersion drip filter plants, stuttgart Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, vol. II. R. Oldenbourg Verlag, Munich, RFA.
- 55.- Pypyn, P., Verstraete, W. y Ombregt, J.P. (1979). A pilot scale anaerobic upflow reactor treating distillery waste waters. Biotechnol. Letters. 1:495-500.
- 56.- Quintero, R.H. (1981). Ingeniería Bioquímica. México, D.F. Ed. Alhambra. México D.F. Pp. 176-180.
- 57.- Rico, M. (1984). Las bolsas de azúcar y su utilización por los productos. Col. GEPLACEA, Serie Mercado y Estadísticas. México, D.F.

- 58.- Rico, M. y Huguley, W.A. (1984). The importance of molasses markets. Papers GEPLACEA. México, D.F. Pp 7-45.
- 59.- Russo, C., Sant Anna, G.L. y De Carvalho Pereira, S.E. (1985). An anaerobic filter applied to the treatment of distillery wastewaters. Agric. Wastes, 14:301-313.
- 60.- Sánchez, R.F., Córdoba, P. y Siferiz, F. (1985). Use of the UASB reactor for the anaerobic treatment of stillage from sugar cane molasses. Biotechnol. Bioeng., 27:1710-1716.
- 61.- Secretaría de Recursos Hidráulicos (1976). Uso del agua y manejo del agua residual en la industria. Vol. 8, Azúcar. México, D.F.
- 62.-Sasson, A. (1985). Las biotecnologías, desafíos y promesas. La Habana Cuba. UNESCO/Centro de investigaciones Biológicas. Pp. 238-247.
- 63.- Scriban, R. (1985). Biotecnología. Ed. El manual moderno, México D.F. Pp. 544-555.
- 64.- Speece, R.E. (1983). Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. Environ. Sci. Technol. 9(7):416-427.
- 65.- Standard Methods. (1985). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Ed. AWWA, APHA, WPCF, 16th. Edición. Washington, D.C. EE.UU. de A.
- 66.- Switzenbaum, M.S. y Jewell, W.J. (1980). Anaerobic attached film expanded reactor treatment. J. WPCF, 52:1953-1965.

- 67.- Szendrey, L.M. (1983). Start-up operation of the Bacardi Corporation Anaerobic Filter. En Proc. Third. Int. Conf. Anaerobic Digestion, Boston, MA, EE.UU. de A.
- 68.- Szendrey, L.M. (1986). Methane production from anaerobic digestion of distillery residues. In Biomass Energy Development, Ed. W.H. Smith. Plenum Press, New York, Pp. 517-531.
- 69.- Valdés, J.E., Obaya, A. y García, P.M. (1986). El tratamiento de los residuos en la industria alcohólica. Pub. ICIDCA. La Habana, Cuba.
- 70.- Valderrama, S.B., Pedroza, R., Nieto, Z. y Durán de Bazúa, C. (1988). Informe CONACYT-UNAM. NEX-01-88. Pub. Facultad de Química, UNAM.
- 71.- Velázquez, R. (1970). Bol. Azucarero Mexicano, 243:43-48.
- 72.- Van den Berg, L. y Lentz, C.P. (1979) Comparison between up and downflow anaerobic fixed film reactors of varying surface-to-volume ratios for the treatment of bean blanching waste. En Proc. 34 th Purdue Indust. Waste Conf. 319-325
- 73.- Weigand, P. (1900). Verfahren zur biologischen Reinigung von Abwassern. Patente Alemana No 135755. RFA.
- 74.- Winkler, M.A. (1986). Tratamiento biológico de aguas de desecho. Ed. Limusa, México D.F. Pp. 968-976.
- 75.- Young, J.C. y Mc Carty, P.L. (1969). The anaerobic filter for waste treatment. J. WPFC, 41:160-173.

76.- Zedillo, L.E. (1987). Situación actual de la investigación sobre derivados y subproductos de la caña. ATAM, 1, 13-17.

77.- Zedillo, P.L. (1989). Eficiencia de la industria azucarera. En Seminario sobre la agroindustria cañera. 13 a 17 marzo. México D.F.

78.- Zedillo, L.E. (1990). Informe interno. Instituto para el Mejoramiento de la Producción Azucarera (IMPA). Azúcar, S.A. México D.F. México.