

**TRATAMIENTO DE AGUAS
DE DESECHO DE LA
INDUSTRIA DEL NIXTAMAL**

SIMÓN GONZÁLEZ*

*** Investigador, Instituto de Ingeniería, UNAM**

RESUMEN

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	EL MAÍZ Y SU INDUSTRIALIZACIÓN COMO NIXTAMAL	3
2.1	<i>Antecedentes históricos</i>	3
2.2	<i>Características generales del grano de maíz</i>	4
2.3	<i>Efectos de la cocción alcalina</i>	5
3.	PRODUCCIÓN DE NIXTAMAL	7
3.1	<i>El proceso del nixtamal en la planta CONASUPO de Guadalupe, NL</i>	7
3.2	<i>Balances de materia</i>	11
4.	PROCESOS BIOLÓGICOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE DESECHO	13
4.1	<i>Aspectos generales del metabolismo</i>	13
4.1.1	<i>Clasificación metabólica de los microorganismos</i>	13
4.1.2	<i>Degradación aerobia y anaerobia de nutrientes orgánicos</i>	15
4.2	<i>Procesos biológicos seleccionados</i>	17
4.2.1	<i>Lodos activados</i>	17
4.2.2	<i>Contacto anaerobio</i>	19
4.2.3	<i>Filtros anaerobios</i>	20
4.2.4	<i>Contactador biológico rotatorio (CBR)</i>	22
5.	PROCESOS DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN	25
6.	METODOLOGÍA	29
6.1	<i>Caracterización del nejayote</i>	29
6.2	<i>Lodos activados</i>	29
6.3	<i>Contacto anaerobio</i>	33
6.4	<i>Reactor anaerobio empacado</i>	38
6.5	<i>Contactador biológico rotatorio</i>	40
6.6	<i>Coagulación-floculación</i>	42

7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
7.1	<i>Caracterización del nejayote</i>	45
7.2	<i>Lodos activados</i>	47
7.3	<i>Contacto anaerobio</i>	49
7.4	<i>Reactor anaerobio empacado</i>	52
7.5	<i>Contactador biológico rotatorio</i>	55
7.6	<i>Coagulación-floculación</i>	56
7.6.1	Coagulación con $Al(III)$	56
7.6.2	Coagulación con $Fe(III)$	57
7.6.3	Coagulación con ayuda coagulante	58
7.6.4	Coagulación del efluente del reactor anaerobio empacado	58
7.6.5	Coagulación del efluente del sistema de lodos activados	59
8.	CONCLUSIONES	61
9.	BIBLIOGRAFÍA	65
10.	RECONOCIMIENTO	67
	APÉNDICE A RESULTADOS EXPERIMENTALES	69
	APÉNDICE B DISEÑO BÁSICO DE UNA PLANTA PILOTO PARA EL TRATAMIENTO DEL NEJAYOTE	81

ABSTRACT

Four biological wastewater treatment systems, activated sludge, anaerobic contact process, rotating biological contactor and anaerobic packed-bed reactor were studied in the laboratory for the treatment of wastewater from the alkaline cooking of maize (nejayote). For the purposes of the study the nejayote was characterized. Coagulation-flocculation with aluminium sulfate and a coagulant-aid was applied to nejayote and to the effluents from the activated sludge system and anaerobic packed-bed reactor. The experimental results show that the activated sludge system and the anaerobic packed-bed reactor reach 89 and 91 percent COD removals, respectively. Coagulation-flocculation is efficient for suspended solids but not for soluble solids removal. Using coagulation-flocculation after the activated sludge and anaerobic packed-bed reactor systems efficiencies up to 96 percent COD removal were achieved. Basic and detail design of a pilot treatment plant for nejayote are presented.

RESUMEN

Se estudió a nivel laboratorio el agua sobrante de la industria del nixtamal (nejayote) en cuatro sistemas biológicos para tratamiento de aguas de desecho: lodos activados, proceso de contacto anaerobio, biodisco y reactor anaerobio empacado. También se hicieron pruebas de coagulación-floculación con sulfato de aluminio y con una poliacrilamida, como ayuda coagulante para el tratamiento del nejayote y de los efluentes de los sistemas de lodos activados y del reactor anaerobio empacado. Los resultados experimentales mostraron que tanto el sistema de lodos activados, como el reactor anaerobio empacado alcanzan eficiencias de eliminación, medidas como DQO, del 89 y 91 por ciento, respectivamente. Debe señalarse que la coagulación-floculación que se logra es eficiente para eliminar material suspendido, pero no para material soluble; en este sentido, la remoción de DQO en los efluentes de los sistemas de lodos activados y del reactor anaerobio empacado con coagulantes tiene eficiencias del 96 por ciento. Por último, se presentan los diseños básico y de detalle de una planta piloto para el tratamiento del nejayote.

1. INTRODUCCION

El grave problema de la escasez de agua en Nuevo León ha obligado a la industria en general a buscar alternativas para obtener agua o reutilizarla en diferentes aplicaciones. Al respecto, Industrias Conasupo, SA de CV, en su planta nixtamalizadora localizada en Guadalupe, NL, requiere para su funcionamiento grandes cantidades de agua, las cuales no le pueden ser suministradas en forma satisfactoria. Su consumo de agua es de aproximadamente 1 300 m³ diarios, de los cuales mil corresponden a aguas de desecho con un alto contenido de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

Se considera que las aguas de desecho, también llamadas *nejayote*, son susceptibles de ser tratadas para volverse a utilizar en el proceso del nixtamal.

El estudio que se presenta tiene como objetivos principales mostrar la caracterización de las aguas de desecho o *nejayote*, la identificación del proceso más adecuado para su tratamiento y el desarrollo de criterios de diseño que permitan la construcción de unidades tanto a nivel piloto como a nivel industrial para el tratamiento del *nejayote*.

Mediante un tratamiento adecuado será posible extraer los contaminantes de las aguas de desecho, lo que conduciría a que al reutilizarlas en la elaboración del nixtamal, el consumo de agua potable se reduciría consi
derablemente, además de otro aspecto sumamente importante, evitar la des
carga de material contaminante en el medio ambiente.

2. EL MAIZ Y SU INDUSTRIALIZACION COMO NIXTAMAL

2.1 Antecedentes históricos

A través de los siglos se han llevado a cabo tres grandes revoluciones agrarias: una en el Medio Oriente con la adaptación del trigo, otra en el Lejano Oriente con el manejo del arroz y otra más en el Continente Americano con el cultivo del maíz.

La evidencia arqueológica más antigua que se conoce sobre la existencia del maíz data de hace aproximadamente siete mil años en la parte central de México. Dos mil años después ya se había generalizado su cultivo, y se considera que fue el factor decisivo que favoreció el desarrollo de las grandes culturas en Mesoamérica. En Sudamérica también se empleó el maíz, sin embargo, su influencia no fue grande en el desarrollo de las culturas respectivas (Katz, *et al*, 1974).

Durante la época de las grandes culturas mesoamericanas, el maíz fue el cultivo obligado y predominante de los pueblos precolombinos. Actualmente se han desarrollado híbridos del maíz, los cuales tienen diferentes características alimenticias, así como diversos valores agrarios, dependiendo de su resistencia y adaptabilidad a la climatología regional.

De hecho, el principio del desarrollo de esas culturas se relaciona directamente, no con el control del cultivo y usos del maíz, sino con el descubrimiento del proceso de la cocción alcalina del grano de maíz seco (Katz, *et al*, 1974).

2.2 Características generales del grano de maíz

El grano de maíz tiene varias partes anatómicas (fig 2.1). La cubierta incluye al pericarpio y a la aleurona; el endospermo constituye la mayor parte del grano y el germen contiene al embrión y al escutelo.

El grano seco posee aproximadamente entre 6.8 y 12.08 por ciento de proteínas, 74.5 por ciento de almidones, 12.0 por ciento de agua, 3.4 por ciento de grasas y 1.0 por ciento de cenizas y fibras. Por su parte, la cubierta del grano contiene entre 20 y 22 por ciento de celulosa, entre 2.6 y 4.9 por ciento de lignina y entre 73 y 77 por ciento de hemicelulosa (Illescas, 1943).

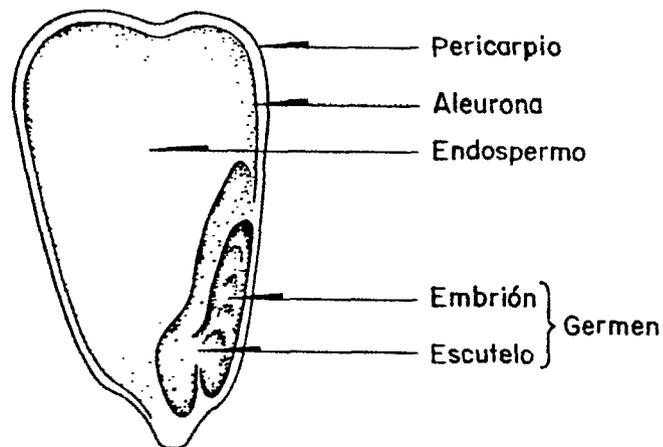


Fig 2.1 Sección longitudinal del grano de maíz (zea mays)

Se han podido identificar en el grano de maíz diferentes clases de proteínas, localizándose principalmente en el endospermo y en el germen. Se clasifican estas proteínas en cuatro diferentes grupos: a) albúminas, b) globulinas, c) zeína, una proteína heterogénea con pesos moleculares entre 20 000 y 50 000, y d) glutelina, otra proteína heterogénea con pesos moleculares entre 20 000 y 1 000 000, la cual es extraíble en soluciones alcalinas. El espectro tan amplio de la glutelina se debe a las uniones disulfuros entre los residuos de cisteína, los cuales favorecen su desnaturalización en soluciones alcalinas (Katz, *et al*, 1974).

2.3 Efectos de la cocción alcalina

La cocción alcalina del maíz produce dos cambios principales en el grano: uno físico y otro químico. El físico consiste en el reblandecimiento del grano facilitando la molienda húmeda; esto le imparte a la *masa*, o producto, una plasticidad que permite su manejo para preparar los alimentos de rivados de ella.

Los cambios químicos son muchos y muy complejos. Uno de los más importantes es la disolución parcial de la cubierta del grano, pudiéndose eliminar casi totalmente al frotar unos granos con otros y enjuagando con agua.

El cambio químico más importante es el debido a la hidrólisis alcalina de la gluteína, el que origina la ruptura y degradación de las grandes moléculas para dar como resultado moléculas más pequeñas, tales como los aminoácidos, lisina y triptofano, los cuales son esenciales para el organismo humano (Trejo González, *et al*, 1982).

La gran importancia de la cocción alcalina radica en que, debido a los cambios químicos que sufren las moléculas en el grano de maíz, aumenta el poder alimenticio del cereal.

3. PRODUCCIÓN DE NIXTAMAL

Este proceso se lleva a cabo de diversas formas, dependiendo de la cantidad de maíz que se procese. Antiguamente el grano se cocía en ollas de barro y se molía en metate. En la actualidad, debido a las grandes cantidades de nixtamal consumidas, esta transformación se realiza en pequeños molinos o en grandes plantas.

Del cambio del grano al nixtamal se obtienen dos productos principales:

- a) la masa, que se utiliza en diversas formas como alimento humano y
- b) el nejayote, o sea las aguas de desecho originadas durante el proceso.

El origen de la voz *nixtamal* se remonta al náhuatl, siendo *nextli* = cenizas de cal y *tamalli* = maíz cocido; por su parte *nejayote* o *nexayote*, también de origen náhuatl proviene de *nextli* y *áyotl* = caldo.

3.1 *El proceso del nixtamal en la planta CONASUPO de Guadalupe, N L*

Dicha planta consta de cuatro grupos de tanques para nixtamal; cada grupo incluye a su vez cuatro tanques, lo que da en conjunto dieciséis tan

ques para nixtamal. A cada grupo de cuatro tanques corresponde una tolva, en la cual se recibe el producto o nixtamal (fig 3.1).

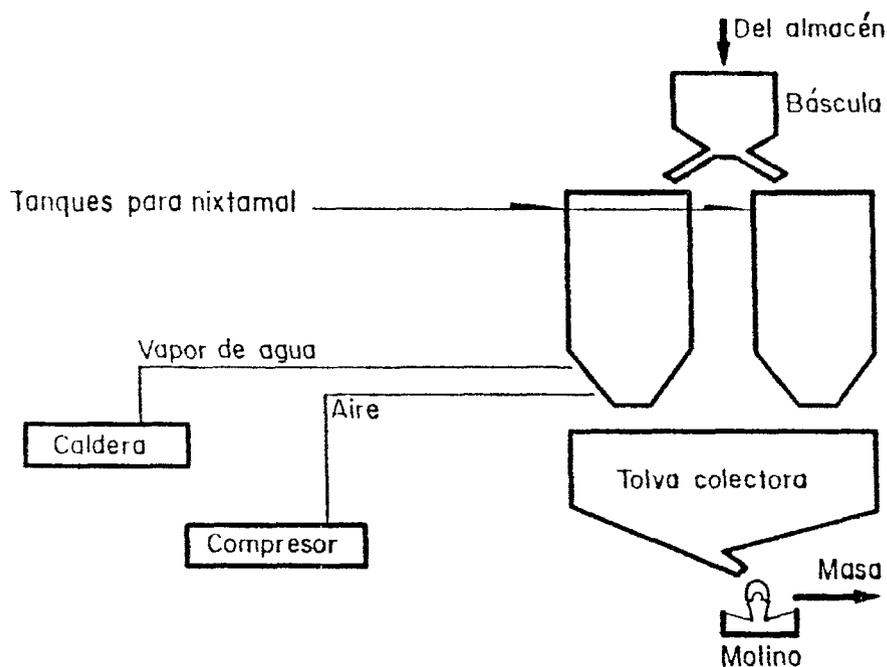


Fig 3.1 Proceso del nixtamal en una planta de Ciudad Gaudalupe, N L

Antes de llevar a cabo el proceso del nixtamal, el maíz es transportado desde los silos hasta una máquina limpiadora y posteriormente a una despedregadora. El maíz es pesado, permitiéndose su paso a los tanques de cocimiento en unidades de 3 ton.

El proceso para el nixtamal es discontinuo o *batch* y se lleva a cabo conforme la siguiente secuencia (fig 3.2):

1. El proceso se inicia con la introducción de 4 m³ de agua potable a temperatura ambiente al tanque
2. Se agregan 25 kg de cal hidratada (hidróxido de calcio con una pureza de 96 por ciento)

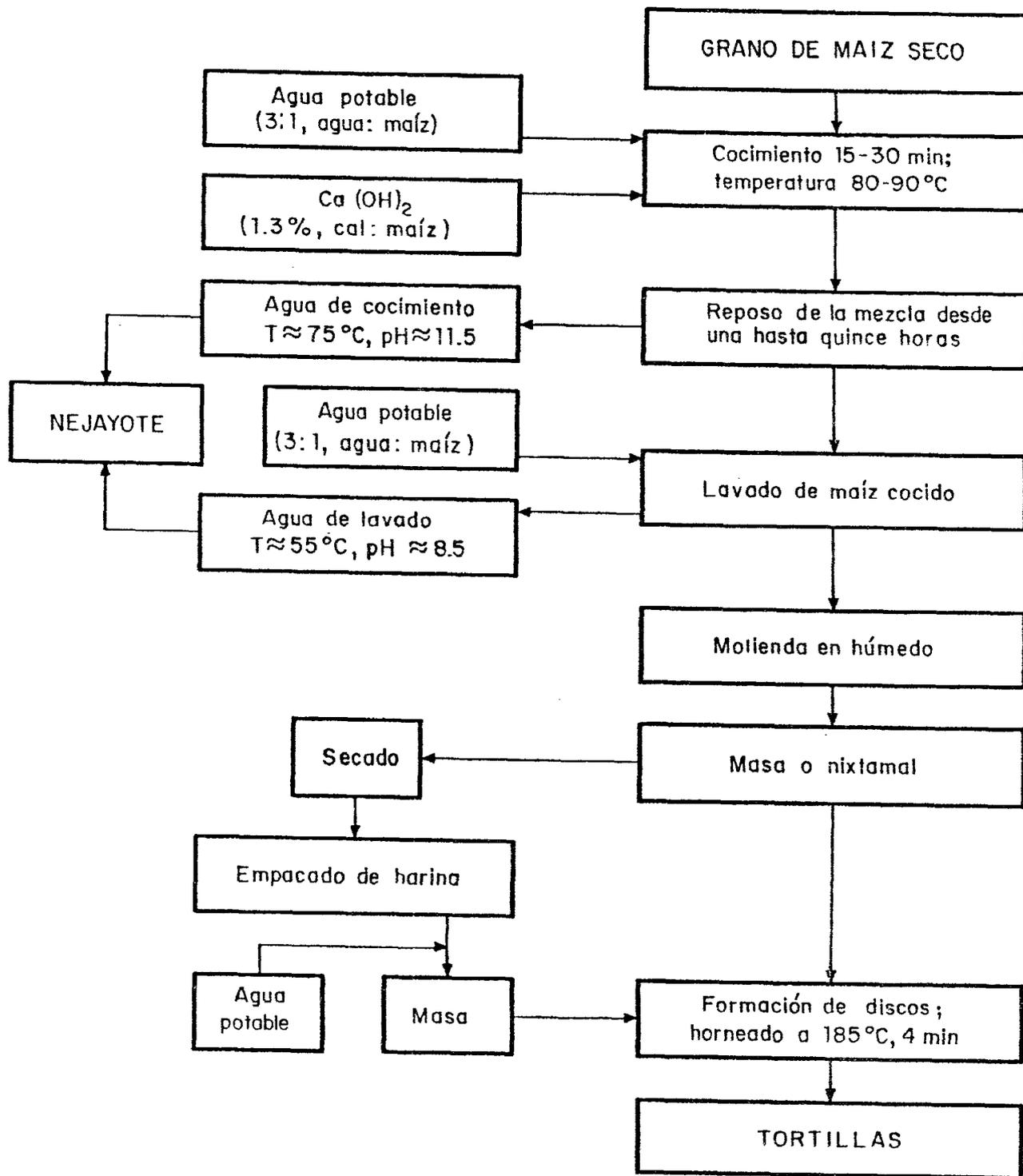


Fig 3.2 Elaboración de nixtamal y preparación de tortillas

3. Se burbujea vapor de agua sobrecalentado para subir la temperatura de la mezcla hasta 93-95 °C
4. Se añaden 3 ton de maíz
5. Se burbujea aire comprimido durante 3 min con objeto de mezclar el contenido del tanque y permitir la flotación de impurezas, las cuales se extraen manualmente
6. Se deja reposar el contenido del tanque durante aproximadamente 60 min. El tiempo de cocimiento o reposo depende del tipo de grano de maíz que sea tratado
7. Se permite la salida del agua de cocimiento
8. Se añaden 2.5 m³ de agua potable a temperatura ambiente
9. Se burbujea aire comprimido durante 3 min para mezclar el contenido del tanque
10. Se permite la salida del agua de lavado
11. El grano, ya convertido en nixtamal y escurrido, se pasa a una tolva que se encuentra en un nivel inferior al de los tanques para nixtamal.

Desde la tolva se dosifica el grano de maíz hacia los molinos, donde se muele en húmedo para formar la *masa*, la cual pasa a secado, tamizado y, finalmente, a empaque.

El agua de cocimiento abandona el sistema a una temperatura de 78-80 °C, y el agua de lavado a 62-64 °C.

La mezcla de las dos aguas o nejayote evacua la planta con temperaturas que varían entre 70 y 72 °C.

3.2 Balances de materia

En promedio, 730 kg de maíz ocupan un volumen de 1 m^3 , del cual 35 por ciento corresponde al volumen libre que se encuentra entre los granos. Esto significa que 730 kg de maíz ocupan un volumen efectivo de 650 ℓ , por lo que 3 ton de maíz abarcan un volumen bruto de 4.1 m^3 y 2.66 m^3 de volumen efectivo.

Al mezclar 3 ton de maíz con 4 m^3 de agua se obtiene un volumen real de 6.66 m^3 . Si el tanque de cocimiento tiene un volumen total de 7.5 m^3 , la diferencia de volúmenes es de 0.84 m^3 , lo que corresponde a una altura de 30 cm entre el límite superior del tanque y la superficie del líquido. Este valor de 30 cm concuerda con el proporcionado por el personal de la planta procesadora de nixtamal.

La humedad relativa promedio del maíz antes de convertirse en nixtamal es de 12.5 por ciento, y ya como nixtamal de 43 por ciento. Considerando que 3 ton de maíz sin ser aún nixtamal contienen 12.5 por ciento de agua, el peso del maíz en base seca es de 2.63 ton. Despreciando la cantidad de sólidos perdida por el grano durante el proceso se tiene que las 2.63 ton de maíz absorben 1.54 ton de agua durante el cocimiento para dar como resultado maíz cocido con un peso total de 4.54 ton, lo que significa un volumen de 4.2 m^3 . Como resultado del balance de materia se tiene que el agua de cocimiento sobrante es 2.48 m^3 .

Durante la operación de lavado no hay absorción de agua en el maíz; la humedad relativa del grano se mantiene constante en 43 por ciento. Para el lavado se le agrega al maíz escurrido agua hasta llegar a la misma altura en el tanque durante el cocimiento. Esto significa que nuevamente el volumen de la mezcla es de 6.66 m^3 . Como el volumen del maíz no cambia y es de 4.2 m^3 , el volumen restante corresponde al agua de lavado, siendo de 2.46 m^3 .

Se puede concluir que para obtener nixtamal de 3 ton de maíz se requieren 6.45 ton de agua, de las cuales 4.91 abandonan el proceso como agua de de secho o nejayote. Las 1.55 ton restantes son absorbidas por el maíz. Pa ra procesar 1 ton de maíz se requieren 2.15 m^3 de agua, los cuales producen 1.64 m^3 de agua de desecho o nejayote. Si la producción máxima significa el consumo de 600 ton de maíz al día, el consumo de agua es de $1\ 290 \text{ m}^3/\text{día}$ y la producción de nejayote de $984 \text{ m}^3/\text{día}$.

4. PROCESOS BIOLÓGICOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE DESECHO

4.1 Aspectos generales del metabolismo

Se tratarán en forma muy general algunos conceptos básicos para el mejor entendimiento de los procesos biológicos en el tratamiento de aguas de de secho.

4.1.1 Clasificación metabólica de los microorganismos

Los microorganismos pueden ser clasificados dependiendo de sus fuentes de energía o carbono, y por donación o recepción de protones.

Dependiendo de su fuente de energía se dividen en: *fotótrofos*, los que ob tienen y transforman la energía radiante (sol) y en *quimiotrofos*, los que obtienen energía de reacciones químicas de oxidación-reducción.

Según su fuente de carbono pueden dividirse en dos grandes grupos: *autótrofos*, los que obtienen carbono de sustancias inorgánicas (CO_2) y *heterótrofos*, los que obtienen carbono de uniones químicas de tipo orgánico.

Los microorganismos *litótrofos* son los que utilizan donadores inorgánicos de protones, y *organótrofos* los que utilizan donadores orgánicos de pro tones.

Las posibles combinaciones de estas tres diferentes clasificaciones se presentan en la fig 4.1.

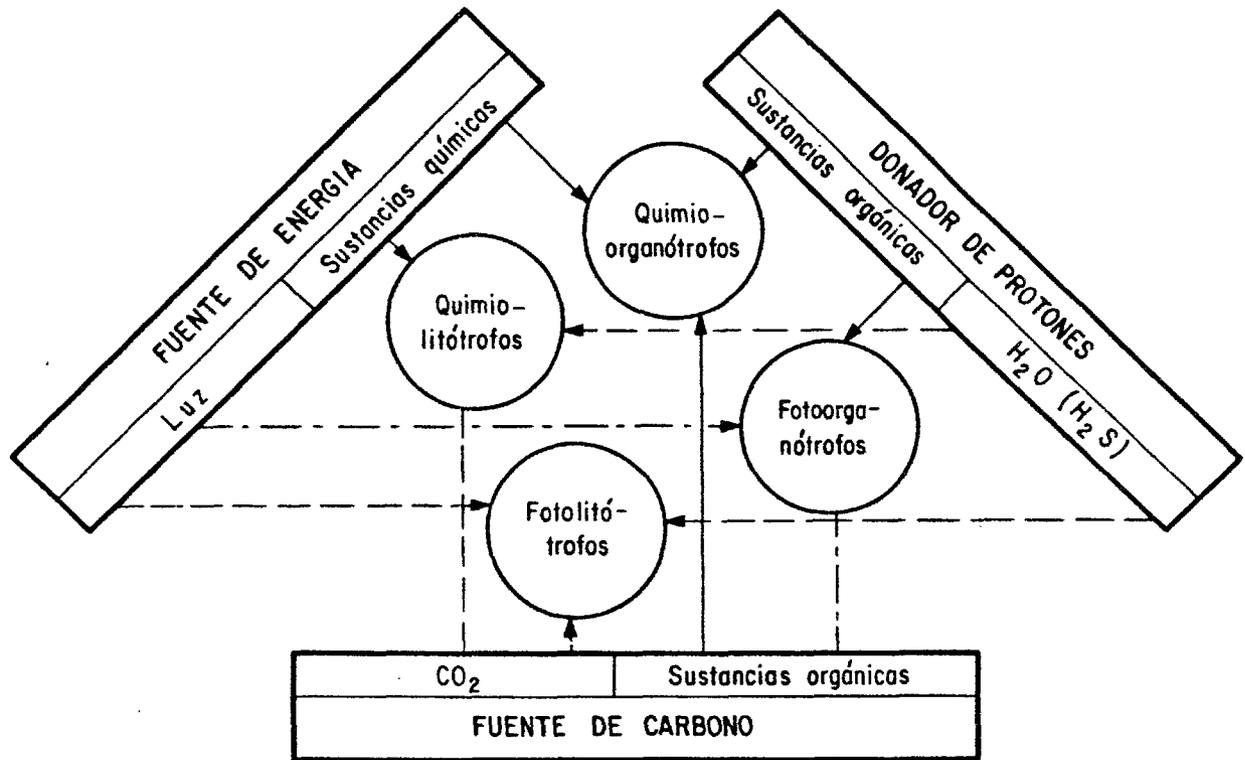


Fig 4.1 Clasificación de los microorganismos según su fuente de alimentos (Hartmann, 1983)

De los cuatro diferentes tipos de alimentación, los dos más generalizados son los *quimioorganótrofos* y los *fotolitótrofos*. Los *fotorganótrofos* y los *quimiolitótrofos* son microorganismos muy especializados, difíciles de encontrar en la naturaleza, y su existencia es objeto de importantes estudios.

Los heterótrofos pueden dividirse en dos grandes grupos: a) *aerobios*, o sea los que utilizan oxígeno molecular como receptores últimos de los protones provistos por los donadores de protones y b) *anaerobios*, los que en vez de oxígeno molecular emplean cualquier otra molécula como receptor de protones. Existe otro grupo de microorganismos heterótrofos que pueden utilizar oxígeno molecular como receptor de protones en caso de que este se

encuentre a disposición; si no existe oxígeno molecular disponible, utilizan alguna otra molécula como receptor de protones; dichos microorganismos se conocen como *facultativos*.

4.1.2 Degradación aerobia y anaerobia de nutrientes orgánicos

Los microorganismos quimiorganótrofos utilizan las grandes moléculas orgánicas como fuente de carbono, de energía y de donadores de protones.

Los microorganismos que pueden realizar metabolismo aerobio degradan las grandes moléculas de proteínas, polisacáridos y lípidos (fig 4.2). Los productos finales, resultado del catabolismo aerobio son moléculas inorgánicas (NH_3 , H_2O , CO_2); como respuesta a las funciones anabólicas se obtienen más células.

En el caso del metabolismo anaerobio, las grandes moléculas sufren cambios parecidos a los del metabolismo aerobio. Estos procesos se llaman fermentaciones.

En los procesos biológicos anaerobios aplicados al tratamiento de aguas de desecho se identifica una serie de reacciones enzimáticas degradativas ocasionadas por diferentes tipos de microorganismos. Cuando se trata de catabolismo aerobio, el propio microorganismo lleva a cabo los cambios de la fig 4.2, no así en el metabolismo anaerobio, en el que los cambios se efectúan mediante dos tipos principales de microorganismos: los hidrolíticos acidogénicos y los metanogénicos.

En la fig 4.3 se describe el conjunto de reacciones enzimáticas que realizan los microorganismos descritos, los cuales se conocen con el nombre de *digestión anaerobia*.

En una primera etapa, los microorganismos hidrolíticos rompen las grandes moléculas en moléculas más pequeñas, las que posteriormente utilizan para formar principalmente ácidos volátiles grasos, o sea los productos finales de su metabolismo.

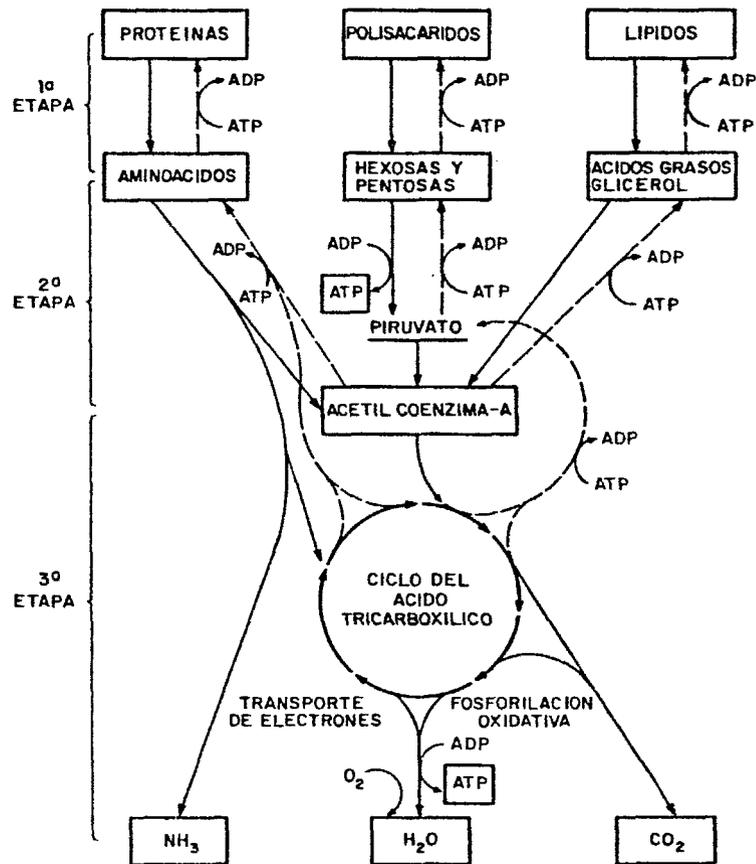


Fig 4.2 Principales pasos del metabolismo aerobio (Lehninger, 1975)

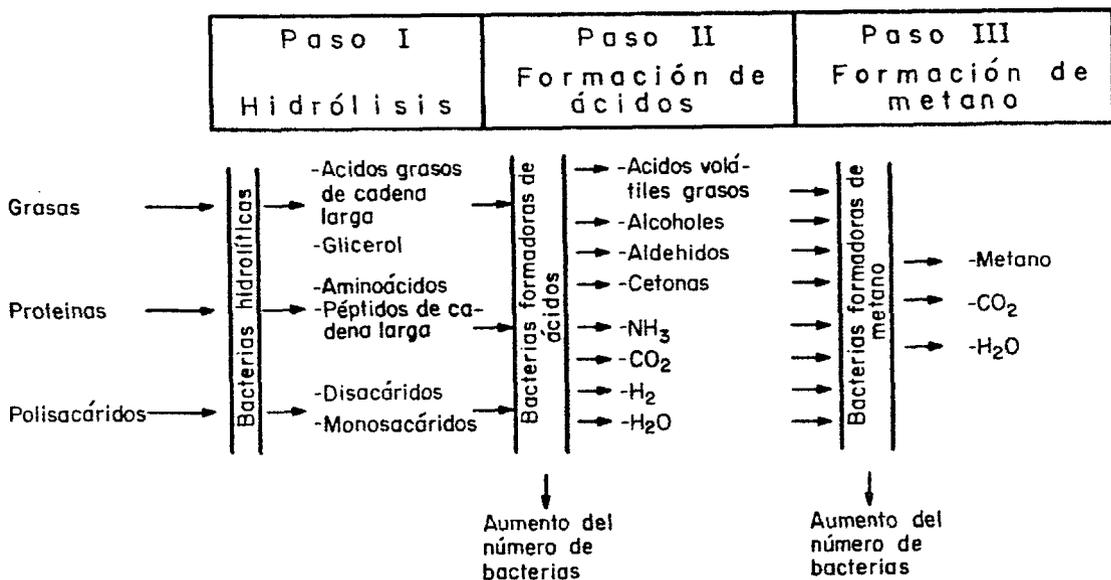


Fig 4.3 Pasos principales de los procesos metabólicos involucrados en la digestión anaerobia

Los productos finales del metabolismo de las bacterias formadoras de ácidos los utilizan las bacterias metanogénicas como alimento. Los productos finales del metabolismo de las bacterias metanogénicas son básicamente, metano, bióxido de carbono y agua.

4.2 Procesos biológicos seleccionados

Los procesos biológicos para el tratamiento de aguas de desecho pueden dividirse en dos grandes grupos, dependiendo del tipo de metabolismo de los organismos presentes: metabolismo aerobio y metabolismo anaerobio. A su vez se subdividen en otros dos tipos, dependiendo de la forma como se localicen los microorganismos dentro del reactor: a) en forma de flóculos suspendidos o b) en forma de película adherida a una superficie rígida e inerte.

Según dicha clasificación se seleccionaron para este estudio los procesos biológicos conforme el siguiente cuadro.

Tipo de formación	Metabolismo aerobio	Metabolismo anaerobio
Película adherida	Contactador biológico rotatorio	Reactor tubular empacado
Flóculos suspendidos	Sistema de lodos activados	Sistema de contacto anaerobio

4.2.1 Lodos activados

Este sistema comprende un reactor y un sedimentador como partes esenciales (fig 4.4). El agua de desecho por tratar se introduce al reactor, donde entra en contacto con los flóculos microbianos. Los microorganismos que forman los flóculos adsorben sobre su superficie las moléculas orgánicas para después degradarlas de forma enzimática y transformarlas en material inorgánico (mineralización) y en material celular (asimilación). La mezcla de flóculos y agua de desecho tratada abandona el reactor para pasar a un sedimentador (secundario), en el cual los flóculos microbianos se separan

por gravedad del agua ya tratada.

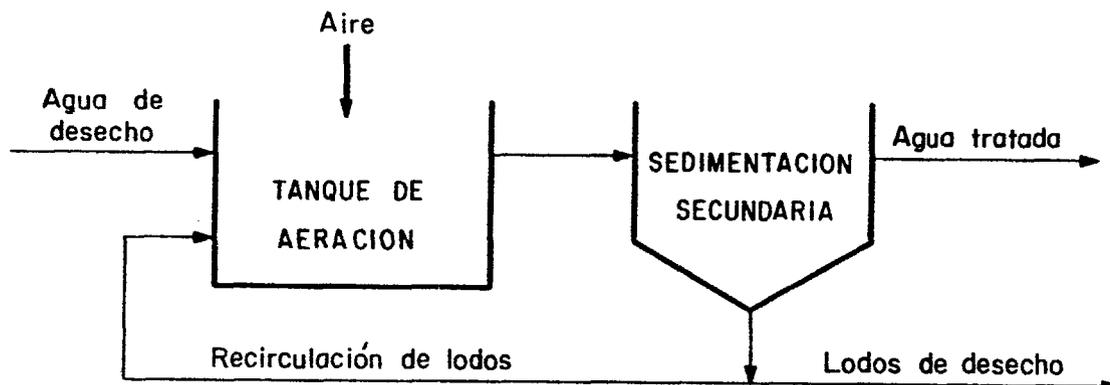


Fig 4.4 Sistema de lodos activados

Una parte de los flóculos o biomasa se recircula al reactor con objeto de mantener constante la concentración de biomasa en él y otra parte se desecha. La cantidad de biomasa desechada es igual a la producción neta de la misma; esto garantiza la condición de operación continua del sistema.

La biomasa que se encuentra en los sistemas de lodos activados tiene una composición heterogénea; consta, en general, de bacterias, hongos, protozoos, rotíferos, nematodos y larvas de insectos. De estos organismos, la mayor parte (90-95 por ciento) la constituyen las bacterias, las cuales a su vez son las responsables de la eliminación de la materia orgánica soluble y coloidal.

Basándose en el metabolismo microbiano, Eckenfelder (1970) considera que el sustrato lo utilizan las células como fuente de energía y como fuente de material para síntesis de nuevas células.

Según Winkler (1981), los lodos activados o flóculos microbianos se encuentran en una etapa de carencia de nutrientes donde solamente una parte de los microorganismos son capaces de reproducirse. Dicha condición de carencia de nutrientes significa que la eliminación de estos no se asocia, de forma estricta, con un proceso de reproducción o crecimiento. Una parte de los flóculos sufre la misma suerte que los nutrientes contenidos en el agua de desecho: son utilizados como alimento por otros organismos. Este proceso se llama *decaimiento endógeno*.

4.2.2 Contacto anaerobio

Los procesos anaerobios para el tratamiento de aguas de desecho ofrecen ventajas y desventajas. Entre las primeras están: a) producción baja de biomasa por unidad de sustrato consumido; esto significa que al ser bajo el crecimiento de los microorganismos, los requerimientos de nitrógeno y de fósforo también serán bajos, b) el metano producido durante el proceso tiene un valor económico, ya que puede ser utilizado como combustible, y c) es posible aplicar altas cargas orgánicas, pues el proceso no está limitado por la transferencia de oxígeno.

Una de sus desventajas es que la temperatura requerida para la reacción es de 35°C, por lo que es necesario calentar el contenido del reactor; otra son los altos tiempos de retención, los cuales obligan a utilizar grandes volúmenes de reacción.

El proceso de contacto anaerobio sigue el mismo patrón que el sistema de lodos activados, con la diferencia de que en este caso, los tanques tanto el de aeración como el de sedimentación están cerrados para evitar el acceso de oxígeno atmosférico al sistema (fig 4.5).

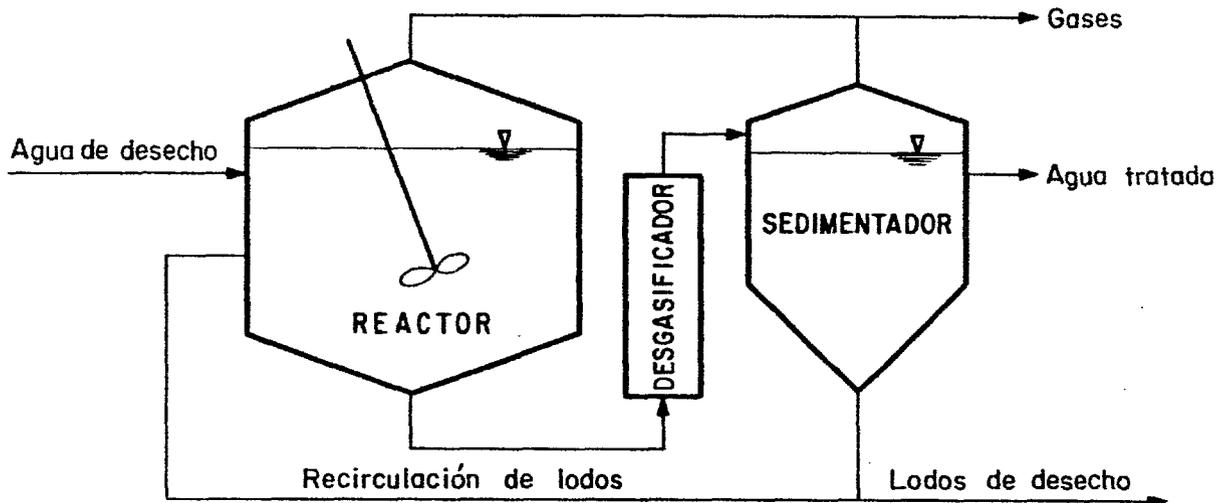


Fig 4.5 Contacto anaerobio

Este proceso ha sido utilizado con éxito para tratar efluentes de la industria alimenticia (Van den Berg, *et al*, 1982, Johansen, *et al*, 1959) y de otras industrias afines (Benefield, *et al*, 1980)

4.2.3 Filtros anaerobios (reactores anaerobios empacados)

Los filtros anaerobios son reactores empacados con algún medio propicio para el desarrollo de una película de microorganismos anaerobios. Su forma es generalmente cilíndrica y es común que las aguas de desecho se introduzcan por la parte inferior del cilindro (fig 4.6).

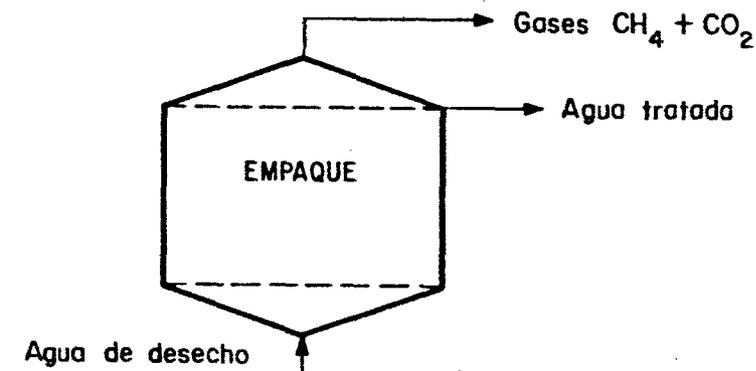


Fig 4.6 Filtro anaerobio

El medio de empaque que puede utilizarse depende de varios factores: costos, eficiencia, peso, área superficial expuesta y la adhesión de los microorganismos al medio (Young, *et al*, 1982).

Este tipo de procesos tiene ventajas y desventajas. Entre las ventajas principales se pueden mencionar (Young, *et al*, 1969):

- Los desechos líquidos con altos contenidos de contaminantes solubles pueden ser tratados con eficiencia
- Los microorganismos se encuentran adheridos al empaque, lo cual permite lograr altos tiempos de retención celular
- La producción de biomasa con respecto a la cantidad de sustrato consumida es muy baja
- No requieren nutrientes balanceados
- Los gases producidos tienen un valor energético
- El sistema puede detenerse durante meses sin que la biomasa sufra cambios perjudiciales.

Algunas desventajas (Benefield, *et al*, 1980):

- Requieren temperaturas dentro del intervalo mesófilo (35 °C)
- Los tiempos de reacción son altos
- Únicamente sirven para tratar desechos solubles
- La flora metanogénica es muy sensible a cambios de temperatura y pH
- El *arranque* es lento
- El agua requiere tratamiento posterior para evitar malos olores y para reducir la cantidad de microorganismos suspendidos
- Los métodos de diseño son empíricos

4.2.4 Contactor biológico rotatorio (CBR)

El sistema de contactor biológico rotatorio (CBR) o biodisco consiste en una serie de discos con diámetros que varían entre 2.5 y 3.5 m, con un es paciamiento entre 2 y 5 cm. Todos están montados sobre un eje que gira a velocidad constante. El eje con los discos va montado sobre un tanque de tal manera que aproximadamente 40 por ciento de la superficie de los dis cos se sumerge en las aguas de desecho que se desean tratar y que están contenidas en el mencionado tanque (fig 4.7). El tren de discos gira entre 1 y 2 rpm; sobre la superficie de los discos se forma una película biológi ca, la cual provoca la metabolización del material orgánico e inorgánico contenido en las aguas de desecho. Al rotar el tren de discos se efectúa la transferencia y transporte de oxígeno atmosférico hasta los organismos aerobios.

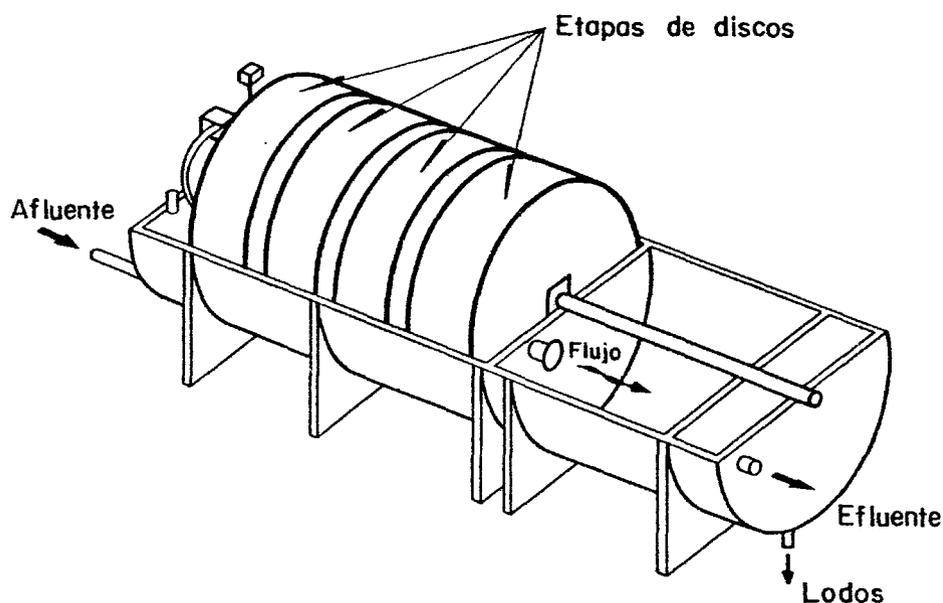


Fig 4.7 Contactor biológico rotatorio (Benefield, 1980)

Generalmente ya no se emplean los discos como medio de crecimiento de biomasa, sino empaques plásticos corrugados que ofrecen un área de contacto mayor que los discos. Al aumentar la concentración de microorganismos por unidad de volumen de material de empaque es posible reducir el volumen del tanque y también los tiempos de reacción.

Este sistema de tratamiento ofrece las siguientes ventajas (Norouzian, 1983):

- Se requieren cortos periodos de contacto debido a la gran área superficial expuesta
- Son capaces de manejar un amplio intervalo de gastos. Desde 40 hasta 4 000 l/s
- No necesita recirculación
- Los costos de operación son bajos debido a la sencillez de operación.

Una gran desventaja son los altos costos capitales, ocasionados principalmente por el precio del material plástico corrugado.

El modelo matemático de Kornegay (1975) puede utilizarse para el diseño del CBR, ya que considera que tanto la biomasa en forma de película como la que forma flóculos intervienen en el proceso degradativo. Del diseño se puede obtener el área superficial requerida.

5. PROCESOS DE COAGULACION-FLOCULACION

Con base en las propiedades de las sustancias que contienen las aguas de desecho, se pueden clasificar dichas sustancias en vivientes o no vivientes, sintéticas o naturales, coloreadas o incoloras, tóxicas o no tóxicas, or gánicas o inorgánicas, biodegradables o no biodegradables, etc. En el caso de los procesos de coagulación interesa saber si las sustancias contenidas en el agua son disueltas, coloidales o suspendidas. Esta división se hace generalmente de acuerdo con el tamaño de la partícula, el cual varía desde algunos Ångstroms, para sustancias solubles, hasta algunos cientos de mi crones para sustancias suspendidas (O'Melia, 1972).

El proceso de la coagulación debe considerarse como dos procesos que se llevan a cabo en forma simultánea. Primero hay que permitir que las partí culas por separar lleguen a ponerse en contacto al cambiar su carga eléc trica y después transportarse o ponerse en contacto unas con otras a fin de formar partículas más grandes (O'Melia, 1970).

El grado de aglomeración de las partículas depende generalmente de facto res químicos. La rapidez de aglomeración tiene relación con la frecuencia

de contacto entre unas partículas y otras; por ejemplo, no hay necesidad de agitar una suspensión coloidal estable, pues la aglomeración no se presentará.

La desestabilización y el transporte de las partículas pueden llevarse a cabo de diferentes formas; la más común para la desestabilización es mediante la adición de sustancias químicas, y para el transporte la agitación mecánica.

Las teorías acerca de la desestabilización de las partículas coloidales se basan en la química de coloides y de superficies, en tanto que las del transporte de las partículas se apoyan en la mecánica de fluidos y de partículas. Para el diseño global de procesos de coagulación, los dos procesos mencionados deben considerarse como pasos separados.

La mayor parte de las partículas coloidales tienen carga, la cual provoca fuerzas de repulsión entre partículas similares: esta es la causa principal de la estabilidad de los coloides.

Para provocar la desestabilización de dichas dispersiones, un coagulante debe neutralizar o evitar los efectos de la repulsión de las partículas. El conocimiento de que la estabilidad de los coloides depende de la carga de las partículas condujo al uso de coagulantes con carga opuesta a la de las partículas.

Conociendo las interrelaciones entre la cantidad óptima de coagulante, pH y concentración de coloides y las dos formas de desestabilización que producen las sales de *Al* y *Fe*, es factible operar un proceso de coagulación en forma eficiente. Se pueden describir cuatro tipos principales de suspensiones:

1. Alta concentración de coloides, baja alcalinidad. Este es el sistema más sencillo: únicamente se requiere determinar la dosificación óptima de coagulante. La desestabilización se lleva a cabo por adsorción de polímeros de hidroxometal con carga positiva, los cuales son producidos en pH ácido.

2. Alta concentración de coloides, alta alcalinidad. En este caso, la desestabilización también se lleva a cabo por adsorción y neutralización de la carga en valores de pH ácido y neutral. Es factible utilizar altas dosis de coagulante debido a que la alta alcalinidad mantiene el pH en regiones neutrales, en las cuales los hidroxometales no tienen altas cargas; en este caso es más difícil la neutralización.
3. Baja concentración de coloides, alta alcalinidad. La coagulación se logra fácilmente con altas dosis de coagulante, originando apriamiento de las partículas. Se puede utilizar en este caso una ayuda coagulante para incrementar la interacción entre las partículas.
4. Baja concentración de coloides, baja alcalinidad. En este tipo de sistemas, la coagulación es difícil. Las sales de $Al(III)$ y $Fe(III)$ no afectan al sistema coloidal si son utilizadas como único coagulante. Al agregar el coagulante, el pH baja mucho evitando la formación de flóculos, por lo que para mejorar la coagulación conviene aumentar la concentración de coagulante o la alcalinidad.

6. METODOLOGIA

6.1 *Caracterización del nejayote*

Con objeto de conocer las características de los contaminantes que contiene el nejayote, así como sus cantidades, se llevaron a cabo determinaciones físicas, químicas y biológicas tanto en las aguas de cocimiento y de lavado como en la mezcla de ambas. Dicha mezcla se hizo respetando las proporciones con las que el nejayote sale de la planta de nixtamal.

Se efectuaron análisis de pH, conductividad, alcalinidad, color, turbiedad, sólidos, DBO₅, DQO, nitrógeno Kjeldahl, nitrógeno amoniacal, nitratos, calcio, fósforo y sulfatos. Los métodos que se utilizaron se encuentran en Deutsche Einheitsverfahren (1982), Standard Methods (1981) y Sawyer, *et al* (1978).

Las muestras analizadas provienen de la planta para nixtamal de Industrias Conasupo, SA de CV, en Ciudad Guadalupe, NL.

6.2 *Lodos activados*

Para la experimentación en laboratorio se construyó una celda Eckenfelder con material de placa de acrílico transparente (fig 6.1). Durante el periodo

do de arranque o aclimatación de los microorganismos se alimentó nejayote diluido para acelerar el proceso de arranque. La alimentación al reactor se llevó a cabo en forma continua durante las 24 horas del día mediante una bomba dosificadora de membrana, marca Wallace y Tiernan, serie 94-100.

Durante el periodo de arranque, como parámetros de control, se determinaron una vez al día pH, DQO en el afluente y efluente y sólidos suspendidos totales (SST) en el licor mezclado. Cuando los valores de dichos parámetros permanecieron constantes con respecto al tiempo, se consideró estable la operación del reactor.

Después de aproximadamente un mes de operación se alcanzó la estabilidad en el sistema, aunque esta presentó el inconveniente de que la biomasa no sedimentaba satisfactoriamente en el sedimentador, lo cual ocasionaba la pérdida de la biomasa con el efluente y la baja concentración de microorganismos en el reactor. Se concluyó que el volumen del sedimentador no era el adecuado para un índice volumétrico de lodos tan elevado.

Durante el arranque y la operación del reactor se pudo observar que los tiempos para alcanzar la estabilidad eran tan largos que no sería posible llevar a cabo los cuatro cambios de las condiciones de operación dentro del tiempo programado. Debido al problema del tiempo y a que tampoco se lograba la compactación deseada de la biomasa, se decidió construir cuatro reactores en paralelo a fin de operar cada uno bajo diferentes condiciones (fig 6.2).

La extracción del efluente y de la biomasa, y la adición de nejayote se llevó a cabo de forma manual una vez al día. Esto permitió clasificar a los reactores como semicontinuos. Las formas de operación y muestreo de ese tipo de reactores para obtener parámetros biocinéticos ha sido manejado por Eckenfelder (1970) y Ramalho (1980).

El parámetro de control para la operación de los cuatro reactores es la carga orgánica o relación de nutrientes a microorganismos.

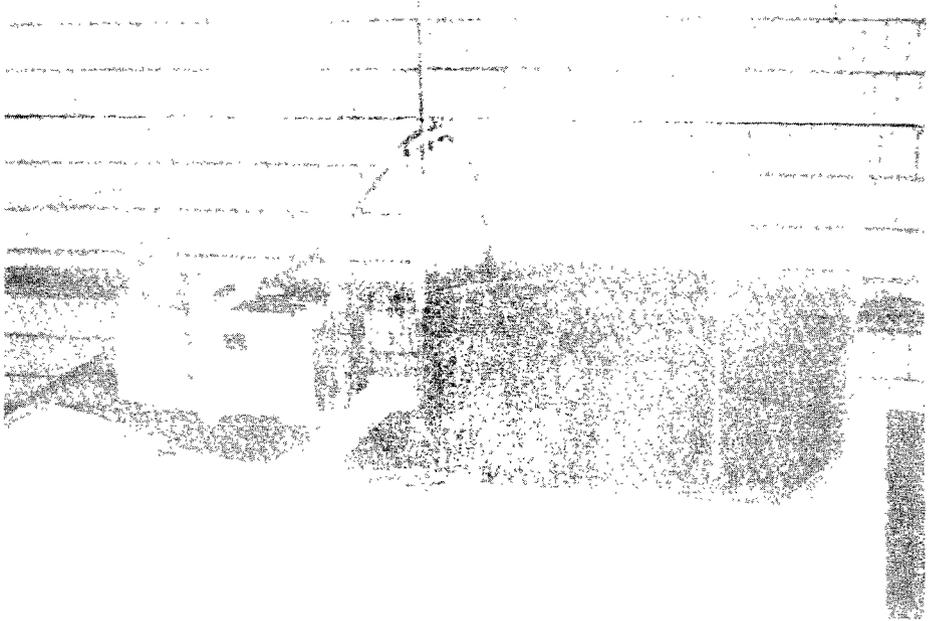
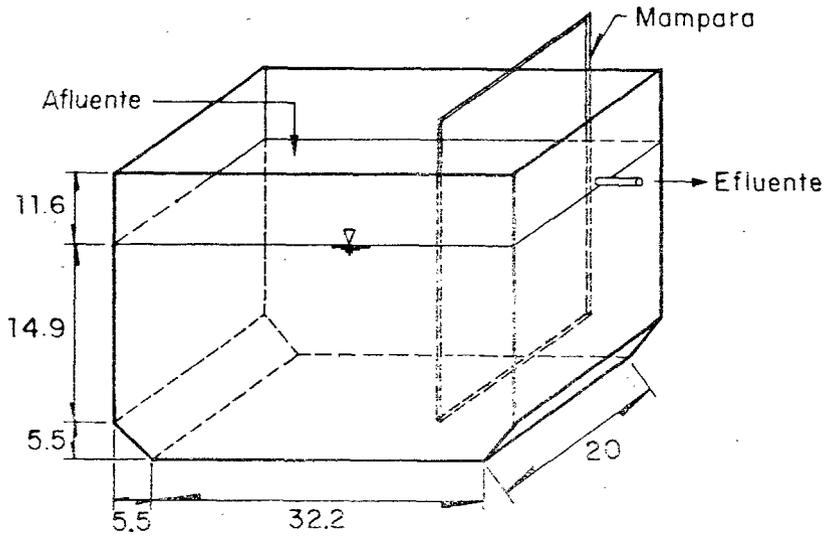
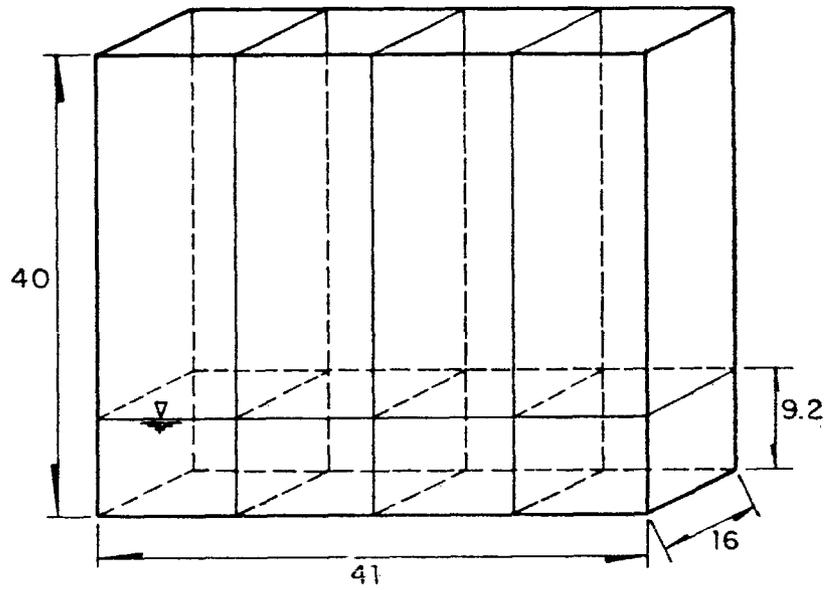


Fig 6.1 Esquema y fotografía de la celda Eckenfelder



Acotaciones, en cm

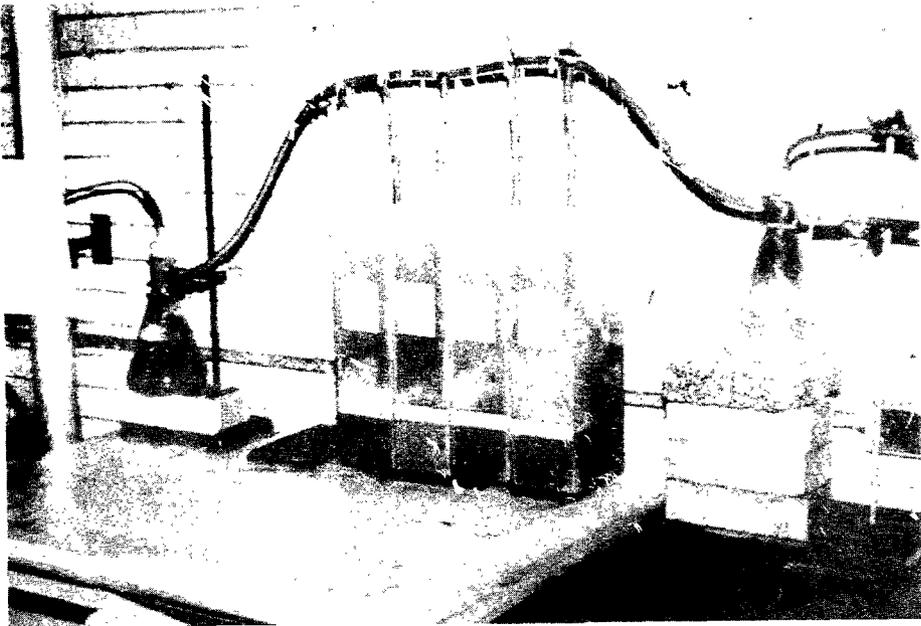


Fig 6.2 Esquema y fotografía de los cuatro reactores aerobios totalmente mezclados

El volumen de reacción de cada uno de los reactores es de 1.5ℓ. Los parámetros de operación de los reactores seleccionando cuatro diferentes valores de carga orgánica se muestran en la tabla 6.1, y en la 6.2 la respectiva forma de observación y análisis. Cabe hacer la aclaración de que algunos parámetros únicamente se determinaron con objeto de observar y controlar la operación de los reactores.

6.3 *Contacto anaerobio*

El sistema de contacto anaerobio fue simulado a nivel laboratorio con el reactor de la fig 6.3. Dicho reactor se selló a fin de evitar el acceso del oxígeno atmosférico. Consta de una parte donde se lleva a cabo la reacción bioquímica y otra que permite la separación de la biomasa del agua tratada. El bombeo del afluente fue en forma semicontinua. Como las bombas disponibles no tienen capacidad para cantidades tan pequeñas como las requeridas, mediante un *energizador de accionamiento periódico (Timer)* se permitió un bombeo de 15 min cada hora. El mezclado se proporcionó a través de un agitador magnético.

Debido a la baja capacidad de sedimentación de la biomasa fue necesario cambiar la forma del reactor. Las medidas adoptadas para lograr el control de la biomasa fueron similares a las utilizadas para el sistema de lodos activados: se construyeron cuatro reactores, con un volumen de un litro cada uno (fig 6.4). Los reactores se sellaron para evitar el acceso del oxígeno atmosférico. Conectado a los reactores mediante mangueras de hule látex se colocó un sistema colector de gases. Así fue posible medir la cantidad de gases producidos, los cuales se analizaron posteriormente para determinar su composición.

Se construyeron cuatro reactores para estudiar en cada uno de ellos los efectos de diferentes formas de operación. El parámetro por variar en cada reactor fue el tiempo de retención hidráulico. Las condiciones de operación están en la tabla 6.3 y el programa de muestreo y análisis en la tabla 6.4.

TABLA 6.1 VALORES UTILIZADOS PARA LA OPERACION DE LOS CUATRO REACTORES AEROBIOS

Reactor	Carga orgánica, en $\frac{\text{kg DQO}}{\text{kg SST d}}$	Q_0 , en m^3/d	S_0 , en $\frac{\text{kgDQO}}{\text{m}^3}$	X , en $\frac{\text{kgSSV}}{\text{m}^3}$	V , en m^3	Tiempo de retención hidráulica, en días
1	0.5	0.97×10^{-4}	17.0	2.0	1.5×10^{-3}	15.5
2	1.3	2.52×10^{-4}	17.0	2.0	1.5×10^{-3}	6.0
3	2.2	4.24×10^{-4}	17.0	2.0	1.5×10^{-3}	3.5
4	3.0	5.82×10^{-4}	17.0	2.0	1.5×10^{-3}	2.6

TABLA 6.2 PROGRAMA DE MUESTREO Y ANALISIS DE LOS CUATRO REACTORES AEROBIOS TOTALMENTE MEZCLADOS

Parámetro	Frecuencia	Afluente	Licor mezclado	Efluente
pH	1 vez/día	X	X	X
Temperatura	1 vez/día	-	X	-
Alcalinidad	1 vez/día	X	-	X
DQO	2 veces/semana	X	-	X
SSV	1 vez/día	-	X	-
IVL	2 veces/semana	-	X	-
Rapidez de consumo de O_2	2 veces/semana	-	X	-
O_2 disuelto	2 veces/semana	-	X	-
Observaciones microscópicas	1 vez/semana	-	X	-

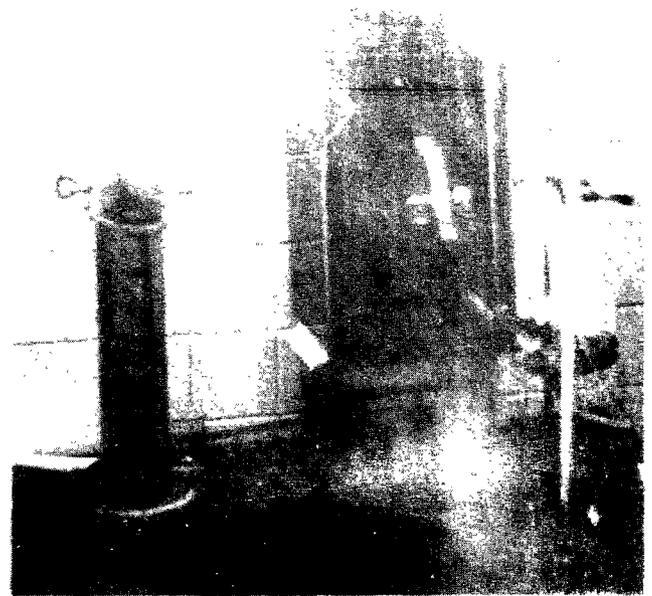
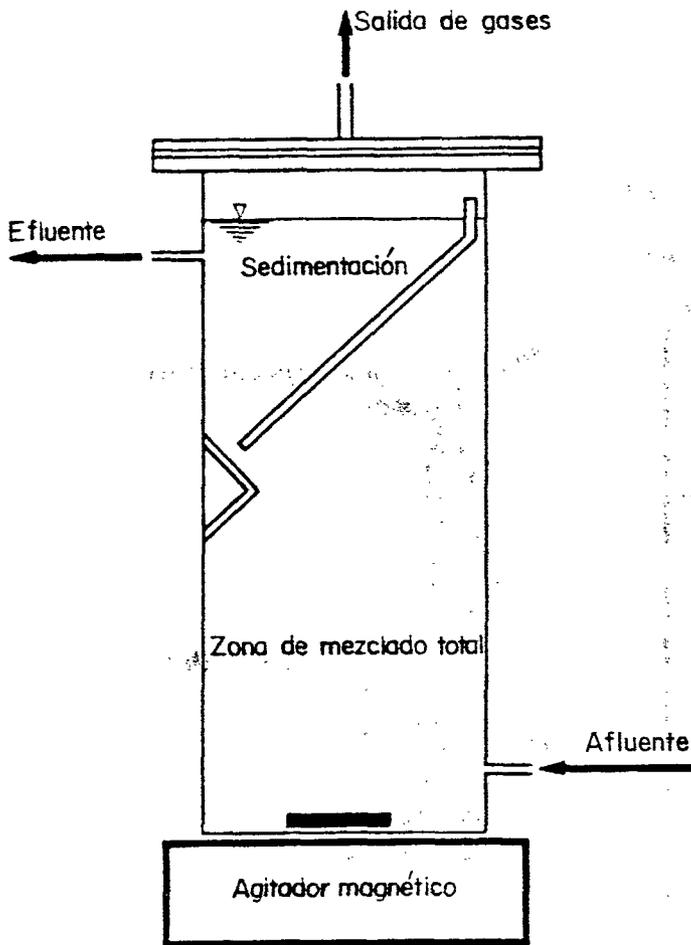


Fig 6.3 Esquema y fotografía del reactor de contacto anaerobio

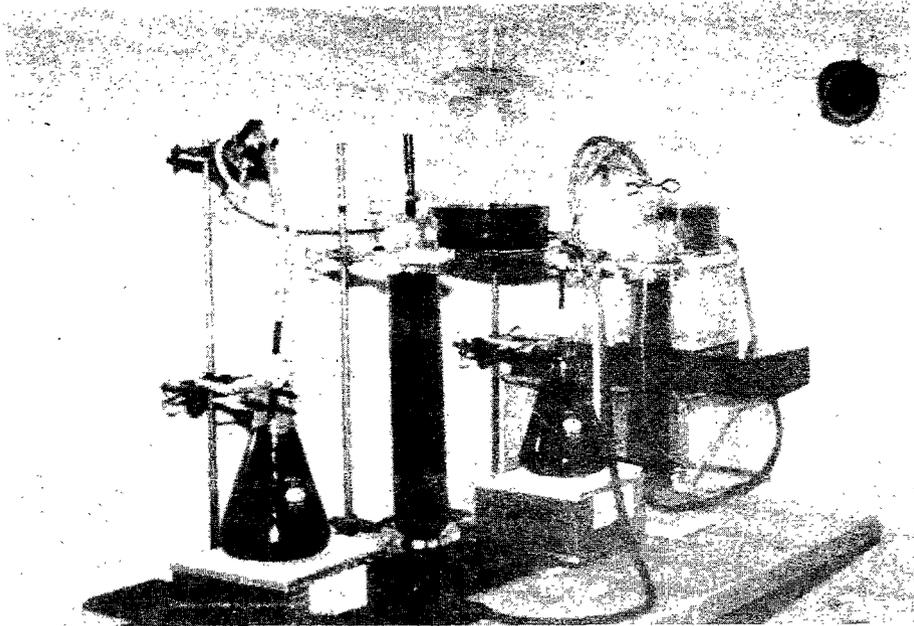
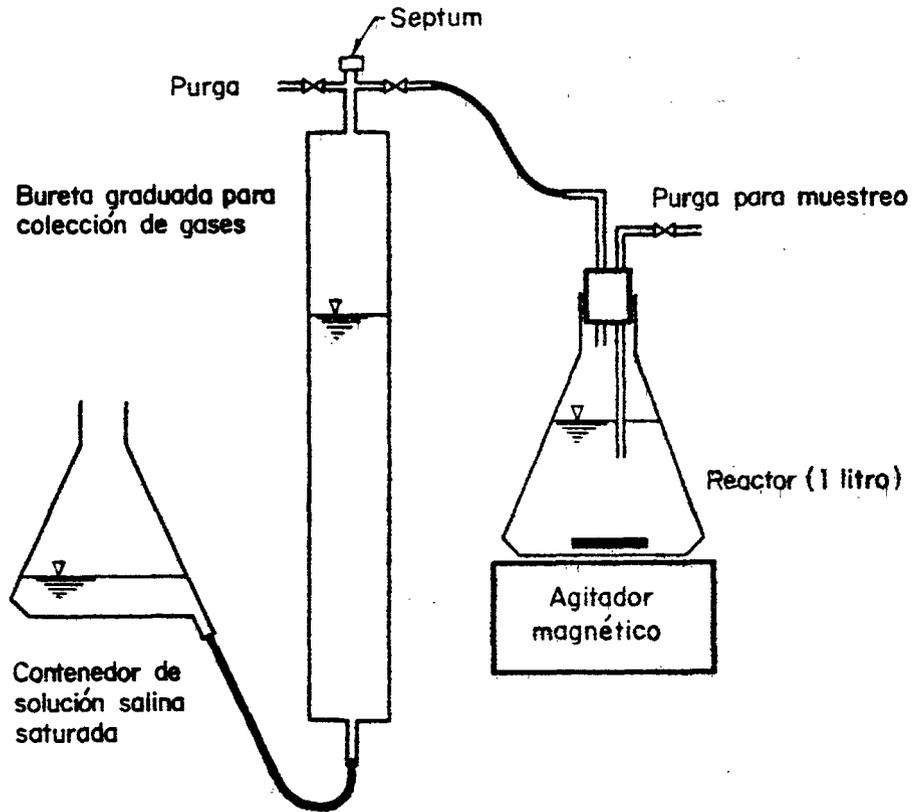


Fig 6.4 Esquema y fotografía de los reactores anaerobios totalmente mezclados

TABLA 6.3 PARAMETROS DE CONTROL PARA LOS REACTORES ANAEROBIOS TOTALMENTE MEZCLADOS

Reactor	Tiempo de retención hidráulica, en días	Q_0 , en m^3/d	S_0 , en $\frac{kgDQO}{m^3}$	V , en m^3	Carga orgánica volumétrica, en $\frac{kgDQO}{m^3 d}$	Carga orgánica específica, en $\frac{kgDQO}{kgSSV d}$
1	5	0.2×10^{-3}	6.0	1×10^{-3}	1.2	0.8
2	10	0.1×10^{-3}	6.0	1×10^{-3}	0.6	0.4
3	15	0.07×10^{-3}	6.0	1×10^{-3}	0.4	0.27
4	20	0.05×10^{-3}	6.0	1×10^{-3}	0.3	0.2

TABLA 6.4 PROGRAMA DE MUESTREO Y ANALISIS DE LOS CUATRO REACTORES ANAEROBIOS TOTALMENTE MEZCLADOS

Parámetro	Frecuencia	Afluente	Licor mezclado	Efluente
pH	1 vez/día	X	X	X
Temperatura	1 vez/día	-	X	-
Alcalinidad	2 veces/semana	X	-	X
DQO	2 veces/semana	X	-	X
SSV	2 veces/semana	-	X	-
Composición de gases	1 vez/semana	-	-	-

Los reactores se operaron dentro de un cuarto temperizado con objeto de mantener su temperatura de operación a 36 °C.

6.4 Reactor anaerobio empacado

Otro de los procesos anaerobios utilizados para estudiar el tratamiento del nejayote fue el de filtros anaerobios empacados. Fue construido con material acrílico; la biopelícula o empaque consistió en anillos Pall. El sistema consta de cinco reactores idénticos conectados en serie mediante una manguera de hule látex. Se sellaron con empaques plásticos a fin de evitar el acceso de oxígeno atmosférico a los reactores. Debido a problemas de espacio y funcionalidad se construyeron los cinco reactores en serie; para fines de evaluación y de cálculo puede considerarse el sistema como un solo reactor, con la altura correspondiente a la suma de las alturas de las cinco unidades (fig 6.5).

Los anillos Pall utilizados como empaque tienen 3.7 cm de diámetro y 3.7 cm de longitud. En cada uno de los reactores se colocaron 32 anillos Pall. La superficie expuesta de cada anillo es de 97 cm². La superficie total expuesta al crecimiento de los microorganismos es de 2.28 m² en un volumen útil de 11.5 ℓ.

Con una bureta modificada se colectó y cuantificó la cantidad de gases producidos. La cuantificación se hizo para todo el reactor y para cada una de las cinco unidades de forma individual. Los gases colectados se analizaron mediante cromatografía.

El sistema se operó bajo tres diferentes cargas orgánicas correspondientes a tres diferentes tiempos de retención hidráulica. Los parámetros de la operación se presentan en la tabla 6.5.

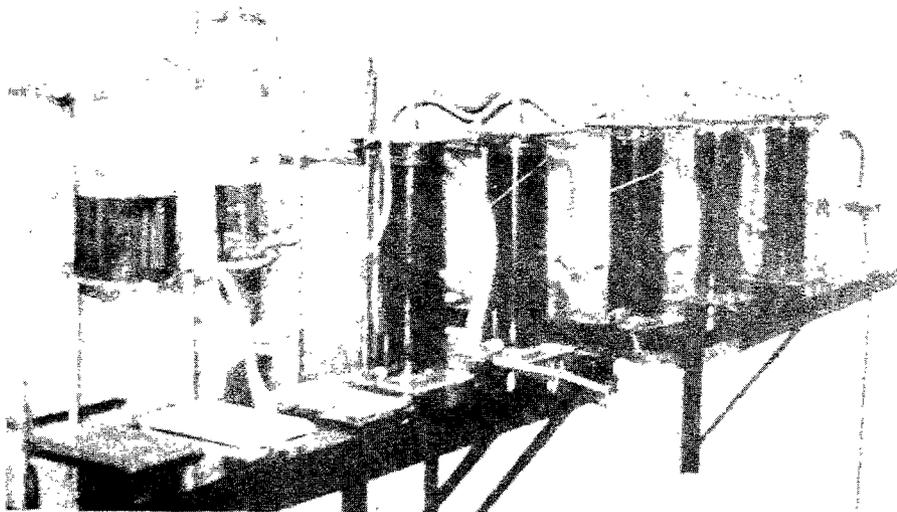
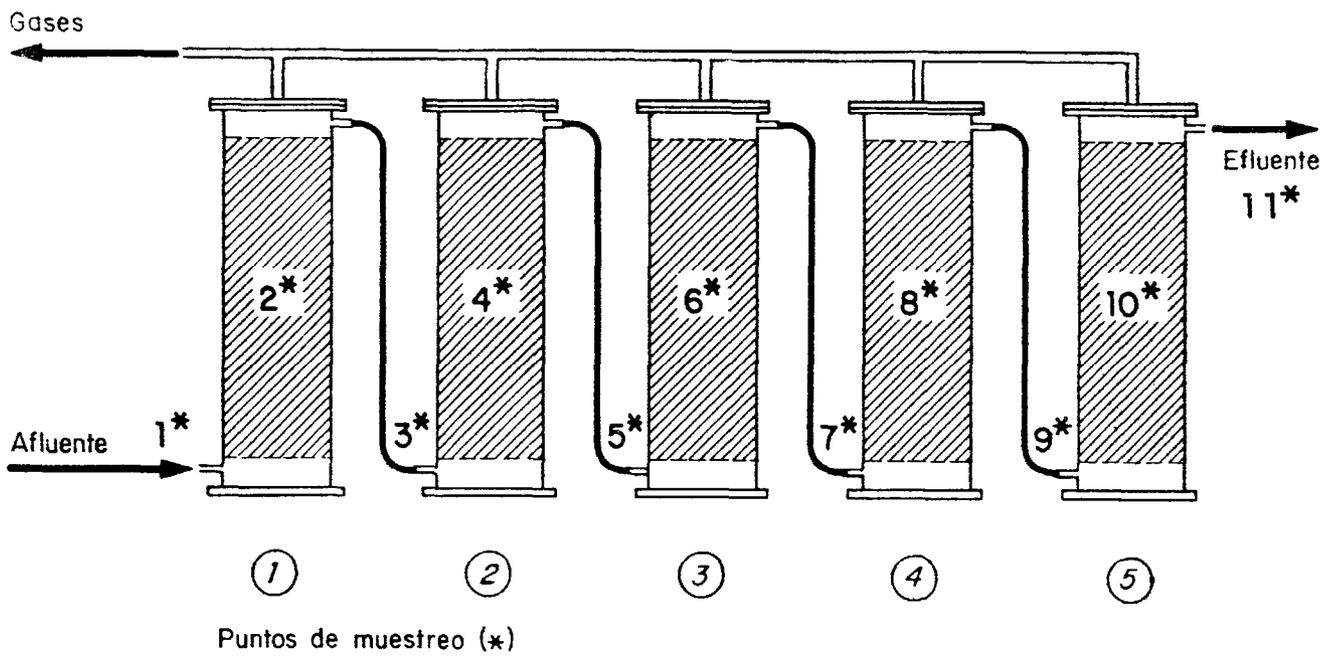


Fig 6.5 Esquema y fotografía del reactor anaerobio empacado

TABLA 6.5 PARAMETROS UTILIZADOS PARA LA OPERACION DEL REACTOR ANAEROBIO EMPACADO

Número de corrida	Q_0 , en m^3/d	S_0 , en $kgDQO/m^3$	Tiempo de retención hidráulica, en días	Carga orgánica volumétrica, en $kgDQO/m^3 d$
1	1.2×10^{-3}	2.06	9.7	0.21
2	2.3×10^{-3}	6.05	5.0	1.30
3	3.9×10^{-3}	4.50	3.3	1.40

Debido a que la formación y adaptación de la biopelícula son lentas, se determinaban como control los valores de pH y de DQO hasta alcanzar la estabilidad. El pH se midió dos veces por semana en cada punto de muestreo, y la DQO a la entrada y a la salida del sistema. Los puntos de muestreo se indican en la fig 6.5. El sistema se operó dentro de un cuarto con temperatura controlada para mantenerla a 36 °C en los reactores.

Cada dos semanas se hicieron las siguientes determinaciones en cada uno de los puntos de muestreo: pH, DQO, alcalinidad total y temperatura. La producción y composición de los gases se determinaron individualmente para los cinco reactores, y para la mezcla producida en todos los reactores.

La alimentación de nejayote se llevó a cabo de forma continua mediante una bomba de membrana, marca Prominent, tipo A 2001.

6.5 Contactor biológico rotatorio

A fin de estudiar la degradación biológica del nejayote en este sistema, se construyó un reactor a nivel laboratorio (fig 6.6).

Los discos del sistema están elaborados con material acrílico transparente de 4 mm de espesor y un diámetro de 30 cm. Se encuentran ordenados en grupos de cinco, formando diez grupos, separados por mamparas. El volumen del tanque es de 49 litros y el área superficial expuesta 8.6 m².

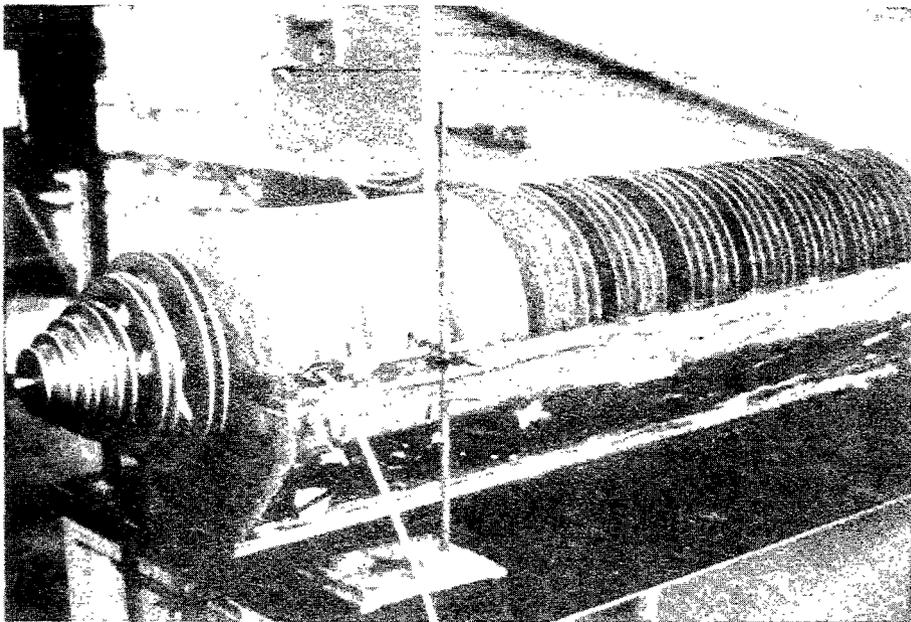
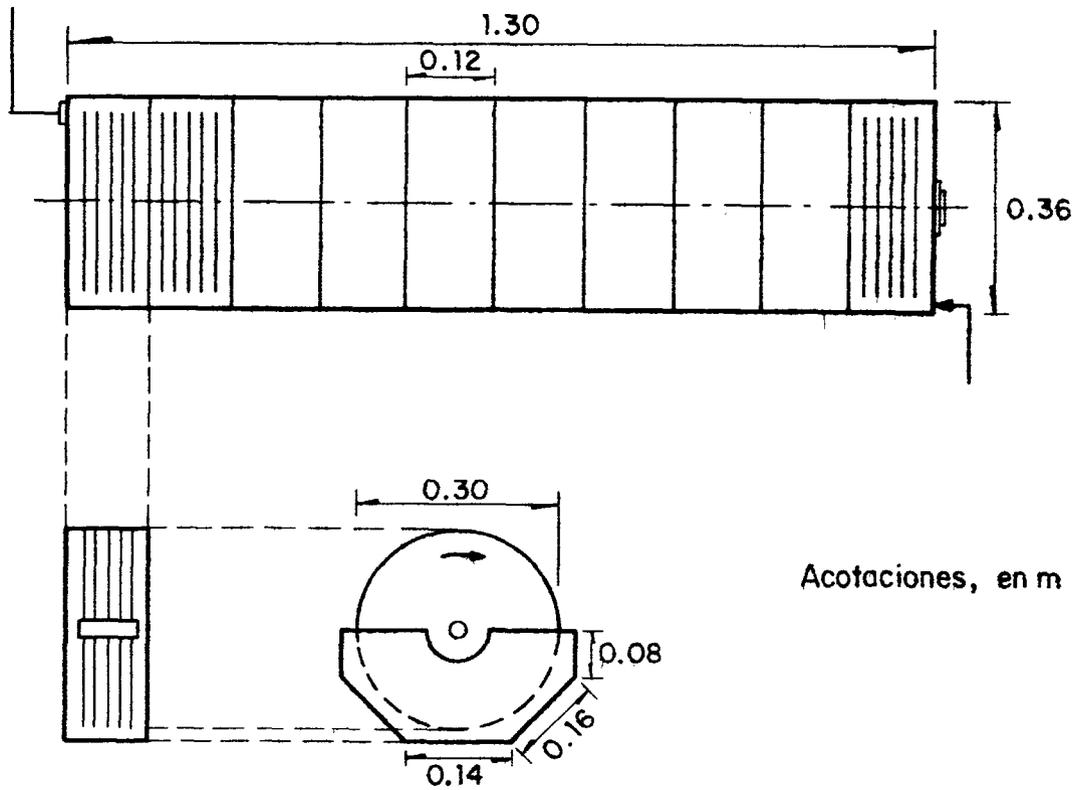


Fig 6.6 Esquema y fotografía del contactor biológico rotatorio (biodisco)

Los discos están montados sobre una flecha de acero inoxidable, la cual se apoya en los dos extremos y en la mitad del tanque por tres rodamientos que permiten el giro del tren de discos y la flecha con el mínimo esfuerzo. El tren es impulsado por un motor de 1/4 HP acoplado a un reductor de velocidad de corona y sinfín, con una relación de reducción de 1/30. Mediante un tren de poleas es posible variar la velocidad de giro desde 7 hasta 60 rpm. De esta forma es factible regular la transferencia de oxígeno y garantizar las condiciones de aerobiosis.

El nejayote se alimentó de forma continua a través de una bomba de membrana.

La experimentación se dividió en tres etapas; cada una de ellas correspondiendo a una carga orgánica diferente (tabla 6.6)

TABLA 6.6 PARAMETROS UTILIZADOS DURANTE LA OPERACION DEL CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATORIO

Periodo experimental	S_0 , en kgDQO/m ³	Q, en m ³ /d	rpm	Tiempo de retención hidráulica, en días	Carga orgánica, en gDQO/m ² d
1	4.3	0.042	16	1.17	20.5
2	6.5	0.041	16	1.18	31.3
3	6.4	0.020	16	2.50	14.8

Durante el proceso de arranque se utilizó nejayote diluido (4 000 mg DQO/l) hasta alcanzar la estabilidad. Como parámetros de control, para identificar la estabilidad del sistema se utilizaron pH y DQO. Una vez alcanzada la estabilidad se llevó a cabo el programa de la tabla 6.7.

6.6 Coagulación-floculación

Como agentes desestabilizadores se utilizaron sulfato de aluminio, cloruro férrico y un polímero polielectrolito aniónico como ayuda coagulante. El polímero es una poliacrilamida con pesos moleculares aproximados de 1.5×10^6 g/mol. Este producto tiene el nombre comercial de SEPARAN.

TABLA 6.7 PROGRAMA SEMANAL DE MUESTREO Y ANALISIS EN EL CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATORIO

Parámetro	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Temperatura	X	X	X	X	X
pH	X	X	X	X	X
Oxígeno disuelto	X	X	X	X	X
Conductividad	-	X	-	-	-
DQO	X	-	X	-	-
DBO ₅	X	-	X	-	-
Turbiedad	-	-	-	X	-
Alcalinidad	-	-	-	X	-
Nitrógeno Kjeldahl	X	X	X	X	X
SST	X	X	X	X	X
Sólidos adheridos	-	-	-	-	X
Nitrógeno Kjeldahl de los sólidos adheridos	-	-	-	-	X

La forma para llevar a cabo la experimentación se conoce como *prueba de jarras*. El aparato consiste en un sistema de agitación de velocidad controlada entre 10 y 100 rpm; consta de un fondo luminoso para observar mejor la formación de los flóculos.

Para la desestabilización con sulfato de aluminio ($Al(III)$) y cloruro férrico ($Fe(III)$), únicamente se tienen dos variables: el pH y la cantidad del reactivo. Ambos parámetros varían en intervalos conocidos y de forma sistemática a fin de abarcar toda la superficie de respuesta.

La coagulación se llevó a cabo para valores de pH de 12, 10, 8, 6, 4 y 2, los cuales se ajustaron con ácido sulfúrico 10 N.

Tanto el sulfato de aluminio como el cloruro férrico se dosificaron como solución acuosa para alcanzar valores en la *prueba de jarras* de 5, 10, 20, 40, 80 y 100 mg de $Al(III)/\ell$ y mg de $Fe(III)/\ell$, respectivamente.

Cuando la desestabilización de coloides se realiza utilizando un polímero como ayuda coagulante se introduce otra variable controlable, que es la concentración de polímero. En este caso se tienen ya tres variables.

Con objeto de disminuir el número de corridas en la *prueba de jarras* se utilizó el método de diseño de experimentos señalado por Himmelblau (1969), que consiste en asignarles tres valores (uno bajo, uno central y uno alto) a cada variable. Según la tabla 6.8, el valor -1 corresponde al valor bajo, el 0 al medio o central y 1 al alto; de esta forma es posible conocer el intervalo de trabajo más apropiado, efectuando una corrida con once vasos de precipitados. El mismo procedimiento se siguió utilizando en los efluentes de los sistemas de lodos activados y filtro anaerobio.

TABLA 6.8 MATRIZ RESULTANTE DEL DISEÑO DEL EXPERIMENTO PARA PRUEBAS DE COAGULACION CON AYUDA COAGULANTE

Número de vaso	Dosis de ayuda coagulante	pH	Dosis del coagulante
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	0	0	0

7.. RESULTADOS Y DISCUSION

7.1 *Caracterización del nejayote*

Los resultados de la caracterización del nejayote se presentan en la tabla 7.1, de la cual se deducen las siguientes observaciones:

1. La cantidad de sales contenida en el nejayote es muy alta, comparada con la de aguas de desecho de tipo doméstico
2. La alta alcalinidad se debe principalmente al contenido de carbonatos y bicarbonatos
3. El valor de pH es muy alto para considerar al nejayote como susceptible de ser tratado en sistemas biológicos sin un ajuste previo
4. La turbiedad proviene de sólidos suspendidos y de material coloidal disperso, los cuales pueden eliminarse mediante sedimentación, coagulación o filtración
5. Los valores de sólidos en base seca, demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno son aproximadamente 20 veces mayores que los valores típicos para aguas de desecho de tipo doméstico
6. El material sólido suspendido es refractario al ataque microbiano. Esta afirmación se basa en los valores de DBO_5 del nejayote conteniendo sólidos suspendidos y sin ellos

TABLA 7.1. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACION DEL NEJAYOTE PROVENIENTE DE LA PLANTA NIXTAMALIZADORA EN CIUDAD GUADALUPE, N.L.

		pH	Conductividad (moh. /cm)	Alcalinidad (mgCaCO ₃ /l)	Color (Long. de onda)	Turbiedad (UTN)	Sólidos (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	DQO (mg/l)	N-Kjeldahl (mg/l)	Amonio (mgN/l)	Nitrato (mgN/l)	Calcio (mg/l)	Fósforo (mg/l)	Sulfato (mg/l)
Agua de cocimiento	Total	11.6	5100	3260	570	380	13310	6190	13650	118	-	-	305	27	-
	Soluble	11.6	5000	2600	572	42	11295	6000	10020	98	4	22	295	24	240
	Suspendido	-	-	660	-	-	2015	190	3630	20	-	-	10	3	-
Agua de lavado	Total	11.6	2100	900	560	240	3010	940	3960	42	-	-	298	7	-
	Soluble	11.6	2100	700	570	30	2540	750	2290	35	2	13	240	2	188
	Suspendido	-	-	200	-	-	470	190	1670	7	-	-	58	5	-
Mezcla de las dos aguas	Total	11.6	3597	2080	565	310	8150	3560	8795	80	-	-	301	17	-
	Soluble	11.6	3547	1650	-	36	6910	3370	6147	66	3	17	267	13	214
	Suspendido	-	-	430	-	-	1240	190	2650	14	-	-	34	4	-

7. La mayor parte de los contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos se encuentran en forma soluble
8. Si se considera la relación de DBO_5 de nitrógeno a fósforo como la relación ideal de nutrientes para microorganismos, la relación debe ser 100:5:1 ($DBO_5:N:P$). La mezcla de las aguas de cocimiento y de lavado tienen una relación de sustancias solubles de 260:5:1, lo cual significa que el nejayote, como alimento para microorganismos aerobios, es deficiente en nitrógeno y fósforo. Debido a que los microorganismos anaerobios presentan una reproducción lenta, la deficiencia de nitrógeno y de fósforo puede ser para ellos un factor sin importancia.

En general es factible concluir que el material orgánico del nejayote es susceptible de ser eliminado mediante procesos biológicos de tratamiento, y que el material suspendido grueso puede ser eliminado por sedimentación.

7.2 Lodos activados

Los resultados de las mediciones en los cuatro reactores aerobios totalmente mezclados se presentan en las tablas A-1 a A-4 del Apéndice A.

Los valores de pH para los cuatro reactores pueden considerarse como satisfactorios debido a que en todos los casos se detectaron valores dentro del intervalo de la neutralidad. Con algunas excepciones, todos los valores de pH oscilan entre 7 y 8, lo cual es deseable, ya que dentro de dicho intervalo las funciones metabólicas de los microorganismos alcanzan un óptimo.

La temperatura de operación es un factor importante que deberá considerarse en el diseño de unidades mayores, ya que es decisivo en la transferencia de oxígeno. A mayores temperaturas, menores son los coeficientes de transferencia de oxígeno.

La información proporcionada por la alcalinidad no es uniforme. Dicho en otra forma, cuando las muestras de nejayote tenían bajos valores de alca

linidad esta tendía a aumentar durante el proceso, lo que puede explicarse debido a la gran cantidad de calcio y de otras sales, y a la incorporación de CO_2 del aire al sistema. Esos factores, junto con la acción del metabolismo microbiano, hicieron que los valores de alcalinidad se estabilizaran entre 600 y 700, y los de pH entre 7 y 8. Este fenómeno también se observa cuando la alcalinidad del nejayote es mayor que la promedio en el sistema. Aquí, la disminución de la alcalinidad puede deberse a procesos de nitrificación al producirse NO_3^- y NO_2^- como resultado del metabolismo de algunos microorganismos especializados.

Uno de los parámetros más importantes dentro de este estudio es la demanda química de oxígeno (DQO), por medio de la cual es factible conocer la eficiencia de remoción de los contaminantes orgánicos.

La tabla 7.2 muestra que la remoción más eficiente se logra bajo condiciones de operación de cargas orgánicas bajas.

TABLA 7.2 RESULTADOS GLOBALES OBTENIDOS EN LOS REACTORES AEROBIOS TOTALMENTE MEZCLADOS

Reactor	DQO promedio afluente, en kg/m^3	DQO promedio efluente, en kg/m^3	Remoción, en %	Tiempo de retención hidráulica, en días	Índice volumétrico de los dos, en ml/g	Cantidad de biomasa producida, en $\frac{\text{mgSSV}}{\text{d}}$	Coefficiente de rendimiento, en $\frac{\text{mgSSV}}{\text{mgDQO}}$
1	16.98	1.87	89	15.0	330	580	0.40
2	16.98	3.21	81	6.0	810	1 385	0.40
3	16.98	4.56	73	3.5	775	1 640	0.31
4	16.98	5.27	69	2.6	985	1 405	0.21

De estos resultados se puede concluir que el nejayote es susceptible de tratarse en sistemas de lodos activados bajo condiciones de carga orgánica baja. De los cuatro casos estudiados, la carga orgánica de 0.5 kg de DQO/kgSST/d es la que proporciona mayores eficiencias, y un índice volúmetrico de lodos alto, aunque no lo suficientemente alto como para no permitir el manejo eficiente de los lodos. El IVL en el caso de los otros tres reactores es excesivamente alto para no tolerar su separación eficiente en tanques sedimentadores.

Como se puede observar en la tabla 7.2, conforme aumenta la carga orgánica, el coeficiente de rendimiento (Y) disminuye; esto se debe a que cuando los microorganismos reciben una cantidad de nutrientes mayor a la que pueden metabolizar por unidad de tiempo, sus funciones metabólicas se desplazan hacia las catabólicas. Cuanto mayor es la carga orgánica, más grande es la cantidad de nutrientes destinada a cubrir los requerimientos energéticos (Abwassertechnik, 1975).

La baja producción de biomasa es deseable, ya que facilita su manejo. Esto se asocia a cargas orgánicas muy bajas (menores de 0.3 kgDQO/kgSST/d) o cargas orgánicas muy altas (mayores de 2.5 kgDQO/kgSST/d). En este caso se tienen dos cargas orgánicas medias y dos altas; las dos medias muestran el mismo valor del coeficiente de rendimiento, el cual conforme aumenta la carga orgánica, disminuye.

Se concluye que, basándose en la eficiencia de remoción de contaminantes, el reactor 1, con carga orgánica media baja, es el que proporciona los resultados más satisfactorios. Aunada a la alta eficiencia, la baja carga orgánica puede ser relacionada a las buenas características de sedimentación de los lodos.

7.3 Contacto anaerobio

Los resultados de las mediciones en los reactores anaerobios totalmente mezclados se encuentran en las tablas A-5 a A-8 del Apéndice A.

Debido a que el metabolismo de una gran parte de microorganismos anaerobios produce ácidos orgánicos es necesario controlar el valor del pH para que las bacterias metanogénicas no se vean afectadas por la acidez de la solución. Como es sabido, los valores de pH óptimos para la extensa mayoría de los microorganismos son los valores de neutralidad.

Por esa razón se agregó bicarbonato de sodio a los reactores anaerobios y así mantener el valor de pH entre 7 y 8, de donde se desprende que los valores de alcalinidad del nejayote sean siempre menores que en el reactor. El aumento artificial de la alcalinidad permite controlar el pH que no baje de 6 ni suba de 8.

La tabla 7.3 muestra los valores promedio de las determinaciones efectuadas durante la operación de los reactores anaerobios completamente mezclados.

TABLA 7.3 RESULTADOS GLOBALES OBTENIDOS EN LOS REACTORES ANAEROBIOS TOTALMENTE MEZCLADOS

Reactor	Tiempo de retención hidráulica, en días	Biomasa en el reactor, en $\frac{\text{kgSSV}}{\text{m}^3}$	Carga orgánica, en $\frac{\text{kgDQO}}{\text{kgSSV d}}$	DQO afluente en $\frac{\text{kgDQO}}{\text{m}^3}$	DQO efluente, en $\frac{\text{kgDQO}}{\text{m}^3}$	Remoción de DQO, en porcentaje
1	5	1.25	0.88	6.38	6.63	-
2	10	1.30	0.34	6.60	6.08	8
3	15	1.81	0.34	6.19	4.29	31
4	20	1.44	0.25	6.32	8.32	-

Los valores de DQO en el efluente no se comportaron de la forma esperada. Una gran parte de la biomasa formada en los reactores no constituyó flóculos sedimentables. En vez de formar flóculos, los microorganismos se encontraban en forma libre, lo cual ocasionaba problemas de tipo práctico para separar la parte soluble de la suspendida. Al no efectuarse una separación eficiente de las partes solubles y suspendidas, las determinaciones de DQO incluyeron parte del material suspendido, originando valores mayores de los que se hubieran logrado al analizar exclusivamente la parte soluble. Este problema se presentó principalmente en los reactores 1 y 4. Siendo la parte suspendida muy pequeña, se concluye de la experimentación que, a pesar del material suspendido, la remoción de los contaminantes solubles es muy baja en los cuatro casos; en el del reactor número 3 se puede considerar como buena la separación de los sólidos suspendidos mediante centrifugación y después por filtración.

El proceso rutinario de extracción de biomasa del sistema no se llevó a cabo. La única biomasa que abandonó el sistema fueron los microorganismos libres, que al no formar flóculos no fue posible separar eficientemente. Al abandonar los microorganismos el sistema en la forma mencionada, no fue factible cuantificar la cantidad que salía con el efluente; como consecuencia no se determinó la cantidad de biomasa producida.

Tanto el proceso de contacto anaerobio como el sistema de lodos activados se basan, junto con la eficiencia de remoción, en la sedimentabilidad de los microorganismos producidos durante el proceso como factor necesario para su realización. Sin la sedimentación de los lodos no hay separación y sin la separación de los microorganismos de los contaminantes no existe proceso de purificación.

Los resultados son definitivos y excluyen al proceso de contacto anaerobio de considerarse como opción para el tratamiento parcial o total del nejayote.

7.4 Reactor anaerobio empacado

Los resultados de este sistema se presentan en las tablas A-9 a A-11.

Los valores de pH se determinaron como parámetro de control. Se pudo observar que como caso extremo, el valor de pH de 5 es el límite inferior tolerado por los microorganismos metanogénicos. Para valores menores de cinco, las funciones metabólicas de dichos microorganismos son tan bajas que se consideran como despreciables dentro del proceso de depuración.

La alta alcalinidad del nejayote evita que debido a la producción bacteriana de ácidos orgánicos, el valor del pH baje aún más. Se puede concluir que la alta alcalinidad del nejayote es un factor positivo para el tratamiento biológico anaerobio, y que si el nejayote tuviera una alcalinidad más baja, existiría necesidad de añadirle sustancias alcalinas a fin de llevar a cabo su tratamiento anaerobio. Se observó que el valor del pH disminuye al aumentar la carga orgánica, lo cual sugiere que si se deseara incrementar la carga orgánica del sistema, sería necesario desarrollar artificialmente la alcalinidad del nejayote.

Analizando los resultados de la alcalinidad en el caso de la segunda carga orgánica, se puede observar su disminución drástica en la primera etapa del sistema por la gran cantidad de ácidos orgánicos producidos. Debido a la acción de las bacterias metanogénicas, los ácidos orgánicos se degradan aumentando paulatinamente la alcalinidad.

Calculando la participación de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos en la alcalinidad, tanto del nejayote puro, como de las muestras procedentes del reactor anaerobio, se determinó que esta procede en casi su totalidad de bicarbonatos. La participación de hidroxilos es nula y la de carbonatos prácticamente despreciable.

La remoción, determinada como DQO para la primera carga orgánica, fue de 91 por ciento; para la segunda también de 91 por ciento y para la tercera

de 90 por ciento. En la fig 7.1 se muestra el tiempo de retención requerido para alcanzar la remoción deseada. Como el tiempo de retención es equivalente a una carga orgánica pueden calcularse tanto el área superficial expuesta requerida como el volumen de reacción apropiado.

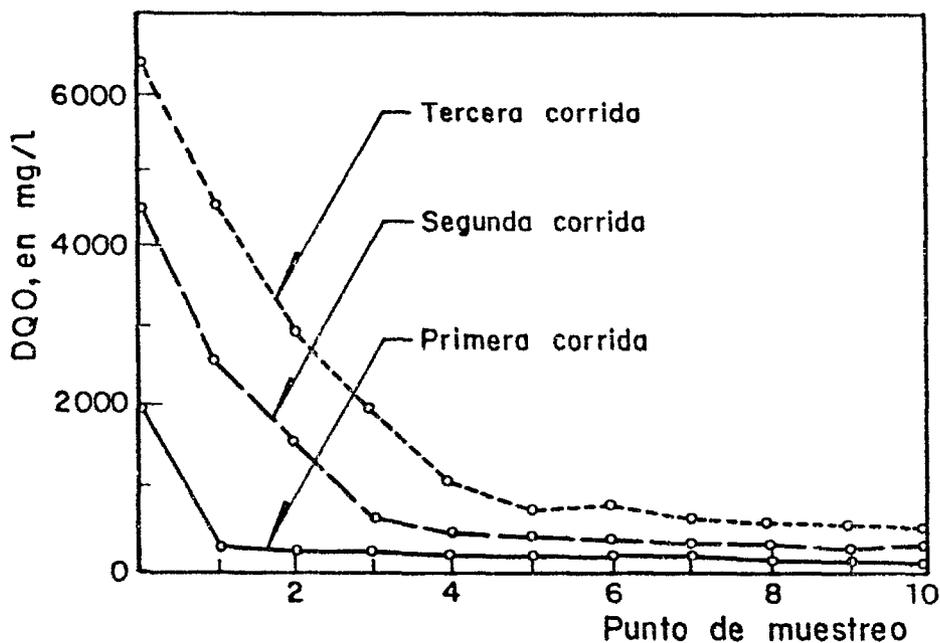


Fig 7.1 Comportamiento de la DQO con respecto a la posición en el reactor anaerobio empacado

Después de ocho meses de operación, el reactor se destapó a fin de observar el estado de acumulación de biomasa, habiéndose apreciado que después de este lapso no había señales de taponamiento ni de obstrucción parcial por efecto del crecimiento de los microorganismos. Lo anterior hace atractivo a este proceso, ya que evita la necesidad de la disposición de la biomasa formada. Pudo observarse en la primera etapa, o primer módulo, que la película de microorganismos tenía un espesor de aproximadamente 2 a 2.5 mm. El crecimiento de microorganismos fue tan lento que se consideró despreciable.

Los nutrientes utilizados por los microorganismos fueron transformados en su casi totalidad en gases. La tabla 7.4 muestra dicha producción en forma global para todo el sistema, así como la producción de gases en cada uno de los módulos.

TABLA 7.4 PRODUCCION Y COMPOSICION DE LOS GASES EN EL REACTOR ANAEROBIO EMPACADO

Reactor	PRIMERA CARGA ORGANICA			SEGUNDA CARGA ORGANICA			TERCERA CARGA ORGANICA		
	Volumen, en l/d	%CH ₄	%CO ₂	Volumen, en l/d	%CH ₄	%CO ₂	Volumen, en l/d	%CH ₄	%CO ₂
1	1.40	58	42	2.88	47	53	2.98	55	45
2	0.06	67	33	3.36	66	34	6.96	57	43
3		67	33	1.79	66	34	1.38	56	44
4		70	30	0.75	74	26	0.66	59	41
5		74	26	0.33	72	28	0.31	67	33
MEZCLA		1.46	62	38	9.11	58	42	12.29	60

Como se aprecia en dicha tabla, la composición se desplaza hacia un mayor contenido de CH₄, debido a que los microorganismos metanogénicos presentes en las últimas etapas utilizan al CO₂ como receptor de protones, transformándolo en metano. Otro dato interesante es que para la primera carga orgánica, la producción específica de gases resultó de 0.65 m³ gases producidos/kg DQO consumido; para la segunda carga la producción fue 0.67 y para la tercera 0.93. Si se considera que la producción de nejayote es de 1 000 m³/d con una concentración de 6.5 kg DQO/m³, la producción de gases será de 4 225 m³/día. Esta cantidad de gases combustibles puede ser un atractivo económico si se toma en cuenta que el 58 por ciento es metano, o sea 2 450 m³ de gas a STP.

7.5 Contactor biológico rotatorio

Según el plan de muestreo descrito en 6.5, en las tablas A-12 a A-13 se encuentran los resultados de las mediciones después de haberse alcanzado la estabilidad para las tres cargas orgánicas.

La tabla 7.5 muestra los resultados globales. Al respecto, en todos los casos, el porcentaje de remoción para la DBO₅ fue mayor que para la DQO, debido a que las hemicelulosas contenidas en el nejayote originaban altos valores de DQO y bajos valores de DBO₅ al ser refractarias al ataque microbiano.

TABLA 7.5 RESULTADOS GLOBALES DE LOS TRES PERIODOS EXPERIMENTALES EN EL CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATORIO

Periodo experimental	DQO, inicial, en kg/m ³	Tiempo de retención hidráulica, en días	Carga orgánica, en kgDQO/m ² d	Coeficiente de rendimiento, en kgSST/kgDQO	Porcentaje de remoción	
					DQO	DBO ₅
1	4.26	1.17	20.5	0.81	48	80
2	6.52	1.18	31.3	2.08	48	86
3	6.40	2.50	14.8	1.24	85	96

La fig 7.2 indica que el proceso degradativo es más intenso en los dos primeros compartimientos del reactor y más lento en los siguientes.

El valor de pH se mantiene en el intervalo de neutralidad, evitando la necesidad de ajustarlo con ácidos o álcalis.

Durante la tercera carga orgánica se alcanzó una remoción de 58 por ciento como DQO y 96 por ciento como DBO₅ para un tiempo de retención hidráulica de 2.5 días; de donde se deduce que es necesario aumentar el tiempo de retención hidráulica para lograr una mejor eficiencia en el sistema.

La producción específica de biomasa no presenta un comportamiento definido: tiene una relación con el tiempo de retención hidráulica y a la vez con la carga orgánica. Lamentablemente, la información no permitió llegar a conclusiones más categóricas.

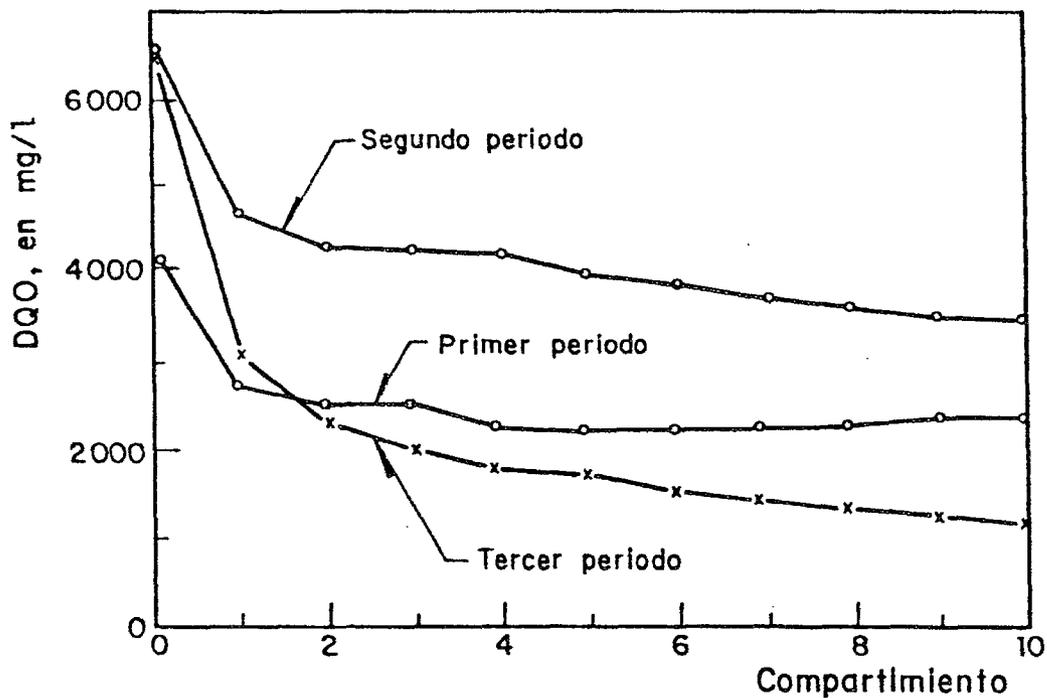


Fig 7.2 Comportamiento de la DQO con respecto a la posición en el contactor biológico rotatorio

7.6 Coagulación-floculación

7.6.1 Coagulación con $Al(III)$

El primer coagulante utilizado fue sulfato de aluminio. Se llevó a cabo la prueba de jarras variando la concentración de aluminio (como $Al_2(SO_4)_3$) en 1.5, 2.5, 5, 10, 20 y 40 mg/l. Se observó que no hubo formación de flóculos en ninguno de los seis vasos de precipitados.

Al no existir formación ni precipitación de flóculos de hidróxido de aluminio se hizo una corrida más, aumentando la cantidad de aluminio y de alcalinidad con una solución de hidróxido de sodio 10N; los resultados se resumen en la tabla 7.6.

TABLA 7.6 RESULTADOS DE LA COAGULACION DEL NEJAYOTE CON $Al(III)$ Y CON ADICION DE $NaOH$

Jarra No	Al^{+++} , en mg/l	$NaOH$, en ml	pH inicial	pH final	Formación de flóculos
1	5	2	11.5	12.0	no
2	10	4	11.5	11.9	no
3	20	6	11.5	11.5	no
4	40	8	11.5	9.7	no
5	80	10	11.5	5.4	no
6	100	12	11.5	5.0	no

7.6.2 Coagulación con $Fe(III)$

Las pruebas de coagulación con cloruro férrico se realizaron en igual forma que con sulfato de aluminio. La primera de las pruebas y sus resultados se incluyen en la tabla 7.7

TABLA 7.7 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE JARRAS PARA NEJAYOTE CON CLORURO FERRICO

Jarra No	Fe^{+++} , en mg/l	pH inicial	pH final	Formación de flóculos
1	5	10.5	8.5	no
2	10	10.5	7.5	no
3	15	10.5	6.0	no
4	20	10.5	5.5	no
5	25	10.5	4.5	no
6	30	10.5	3.9	no

Como no hubo formación de flóculos, las pruebas se realizaron adicionando NaOH de la misma forma que para el sulfato de aluminio.

En todos los casos se pudo observar la ausencia de flóculos.

7.6.3 Coagulación con ayuda coagulante

La ayuda coagulante se dosificó de acuerdo con la tabla 6.8. Considerando tres variables, la matriz utilizada para la prueba de jarras con ayuda coagulante se muestra en la tabla A-15.

La poliacrilamida SEPARAN de DOW CORNING se disolvió en agua para emplearse en forma líquida. El peso molecular del polímero es 1.5×10^6 gramo/mol. La solución de SEPARAN fue preparada al 0.5 por ciento en peso. Esto significa que un mililitro de la solución contiene 5 mg de polímero. La solución de coagulante, en este caso sulfato de aluminio, se preparó para dar 1 mg Al^{+++} /ml.

En la tabla A-15 se resumen los resultados y las condiciones bajo las cuales se llevó a cabo la experimentación, utilizando una ayuda coagulante para el nejayote puro. Se observó que la mejor remoción de DQO fue en la jarra 5. Conociendo las condiciones bajo las cuales se obtiene la más alta remoción se diseñó una nueva corrida, cuyas condiciones y resultados se encuentran en la tabla A-16. Esta segunda corrida se realizó con valores cercanos a los de la jarra 5 de la primera corrida.

De la segunda corrida, las condiciones óptimas de remoción de DQO correspondieron a las jarras 4 y 6. A pesar de obtener una remoción máxima de 23 por ciento, el valor no se consideró aceptable para el tratamiento del nejayote.

7.6.4 Coagulación del efluente del reactor anaerobio empacado

Se llevaron a cabo pruebas exploratorias para saber si el sulfato de aluminio o el cloruro férrico eran capaces de desestabilizar las partículas

contenidas en el agua tratada. El resultado fue negativo, lo cual condujo a pruebas de jarras con ayuda coagulante.

La primera corrida fue para localizar un intervalo de operación óptimo y la segunda para encontrar las condiciones óptimas.

Las condiciones y resultados de la primera corrida se incluyen en la tabla A-17. Los resultados de la primera corrida mostraron que la floculación, que se realizó en todos los casos, tuvo mejores resultados en la jarra número 5. Esto es satisfactorio, ya que la cantidad de ayuda coagulante es baja y el valor del pH se encuentra dentro del intervalo de la neutralidad.

Con objeto de optimar las condiciones se hizo una segunda corrida; las condiciones y resultados respectivos pueden verse en la tabla A-18.

La coagulación de las partículas contenidas en el efluente del reactor anaerobio empacado tuvo éxito parcial, ya que permitió eficiencias en la remoción de DQO de 40 por ciento como máximo.

La combinación del reactor anaerobio empacado y los procesos de coagulación con ayuda coagulante permiten eficiencias hasta de 95 por ciento en el tratamiento del nejayote, lo cual se considera excelente.

7.6.5 Coagulación del efluente del sistema de lodos activados

Las pruebas de coagulación utilizando el efluente del sistema de lodos activados corresponden a la tabla A-19, donde se observa que las condiciones óptimas de remoción fueron las utilizadas en la jarra 5, con una remoción de 79 por ciento, y en las jarras 9, 10 y 11 con remoción promedio de 73 por ciento. Como el precio de la ayuda coagulante es un factor que controla el proceso, se consideraron óptimas las condiciones establecidas para la jarra 5: ayuda coagulante, 5 mg/l; coagulante, 20 mg Al⁺⁺⁺/l; pH = 7.

Estimando como tratamiento secundario el sistema de lodos activados y, posteriormente, el de coagulación como terciario, se obtuvo una remoción global de DQO de 97 por ciento, lo que se supone excelente.

8. CONCLUSIONES

1. La temperatura del nejayote al abandonar el proceso del nixtamal es alta, por lo cual es necesario enfriarlo antes de tratarse en un sistema biológico o en uno de coagulación-floculación.
2. Hay que ajustar el valor del pH del nejayote antes de su tratamiento; dependiendo del proceso que se siga, el valor del pH debe ser neutro o ligeramente alcalino (para sistemas biológicos aerobios o de coagulación-floculación) o moderadamente alcalino (para procesos biológicos anaerobios).
3. En el nejayote, los valores de sólidos en base seca, de DBO₅ y de DQO, son aproximadamente veinte veces mayores que los valores típicos de aguas de desecho domésticas (agua negras).
4. Aproximadamente 75 por ciento de los contaminantes orgánicos contenidos en el nejayote se encuentran en forma soluble. Las partículas suspendidas pueden separarse por sedimentación con relativa sencillez.
5. El sistema de lodos activados permite alcanzar eficiencias de 89 por ciento para cargas orgánicas bajas. Esto significa que los tiempos de reacción pueden oscilar entre dos y cinco días, dependiendo de la concentración del nejayote.

6. La sedimentación de lodos en el sistema de lodos activados, para cargas orgánicas medias y altas, fue casi nula, lo cual no permitió considerar este sistema como opción en operaciones bajo otras cargas orgánicas que no sean bajas.
7. El sistema de contacto anaerobio no fue apto para el tratamiento del nejayote debido a su baja eficiencia. Esto se asoció con el hecho de que los microorganismos anaerobios, bajo las condiciones impuestas, no formaban flóculos sedimentables.
8. El reactor anaerobio empacado, al alcanzar valores de remoción de DQO de 91 por ciento en un tiempo de reacción de tres días, se puede tomar como opción para el tratamiento del nejayote.
9. Es factible considerar la cantidad de gases combustibles producidos en el reactor anaerobio empacado como una aportación importante que compense los gastos de energéticos en una planta de tratamiento de aguas de desecho.
10. La cantidad de biomasa producida en el reactor anaerobio empacado fue tan baja que es prácticamente despreciable, lo que simplifica la operación del sistema al no existir necesidad de equipar la planta para disponer de la biomasa.
11. Aunque el contactor biológico rotatorio alcanzó eficiencias ligeramente menores a las logradas en el sistema de lodos activados y en el reactor anaerobio empacado, puede considerarse como alternativa por ser un sistema más seguro y fácil de operar que el de lodos activados.
12. Los dos sistemas biológicos de más alta eficiencia fueron el de lodos activados y el reactor anaerobio empacado.
13. La desestabilización de las partículas contenidas en el nejayote con $Al(III)$ y con $Fe(III)$ no fue posible para lograr su coagulación.

14. Con $Al(III)$ como coagulante y una poliacrilamida aniónica resultó posible separar gran parte de las partículas coloidales contenidas en el nejayote; sin embargo, esto no significa que su eficiencia para la remoción de DQO sea tan satisfactoria como la alcanzada en los sistemas biológicos.
15. Los efluentes de los dos sistemas biológicos que permiten la más alta eficiencia pueden ser tratados exitosamente con sulfato de aluminio como coagulante y con SEPARAN como ayuda coagulante.
16. La combinación de los sistemas biológicos más eficientes con el proceso de coagulación permitió eficiencias de remoción excelentes (95 por ciento).

El escalamiento de resultados a nivel laboratorio para el diseño de plantas de tipo industrial presenta invariablemente una incertidumbre con respecto a la aplicabilidad de los resultados a mayor escala. Dicha incertidumbre se basa en la reproducción a nivel industrial de las características físicas del reactor utilizado en laboratorio. Los parámetros cinéticos obtenidos en el laboratorio no cambian en los procesos a nivel industrial. Algunos factores físicos difíciles de duplicar en el ámbito industrial son la distribución del fluido dentro del reactor, la posición de la alimentación, la forma de transferencia de calor, etc.

Con objeto de ampliar el conocimiento sobre la tratabilidad del nejayote, se propone continuar el estudio a nivel piloto para encontrar las condiciones óptimas de operación y desarrollar un criterio de diseño óptimo y aplicable a cualquier tipo de nejayote.

La planta piloto propuesta consta de los dos sistemas biológicos de procesamiento más eficientes, los cuales pueden ser operados en forma paralela o en serie (fig 8.1). Como sistema terciario de tratamiento se incluye uno de coagulación-floculación que utilice coagulante y ayuda coagulante. Dicha planta piloto debe ser construida y operada en las inmediaciones de una planta para nixtamal a fin de tener a disposición suficiente nejayote.

En el Apéndice B se presenta el diseño básico de una planta piloto que permita desarrollar criterios de escalamiento para la construcción de una planta a nivel industrial.

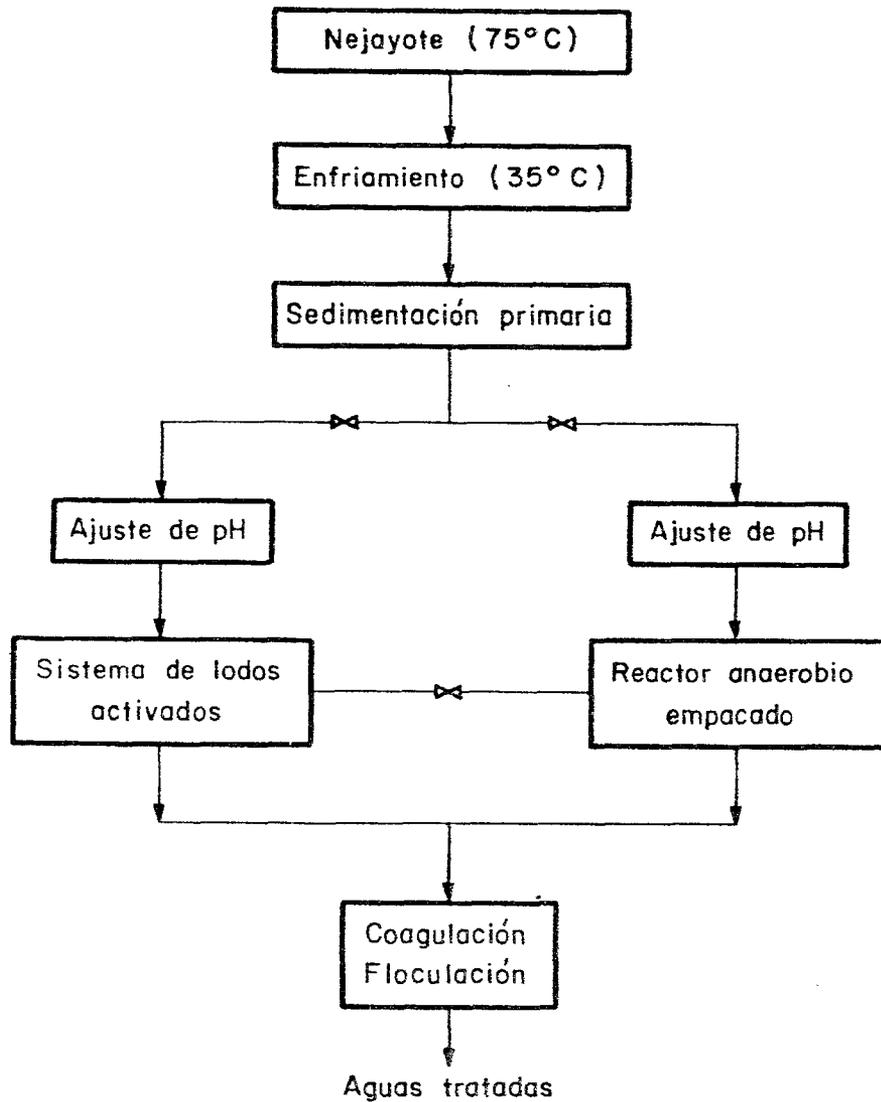


Fig 8.1 Tratamiento del nejayote a nivel planta piloto

9. BIBLIOGRAFIA

Standard methods for the examination of water and wastewater, American Public Health Association, 15 edición, Wáshington, DC (1981)

Benefield, L D y Randall, C W, *Biological process design for wastewater treatment*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, EUA (1980)

Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, Verlag Chemie, Weinheim, Deerfield Beach, Florida, Basilea (1982)

Eckenfelder, W W y Ford, D I, *Water pollution control. Experimental procedures for process design*, The Pemberton Press, Jomkins Publishing Company. Austin y Nueva York (1970)

Hartmann, L, *Biologische Abwasserreinigung*, Springer Verlag, Berlín (1983)

Himmelblau, D M, *Process analysis by statistical methods*, John Wiley and Sons Inc, Nueva York (1970)

Illescas, R, "La teoría química de la formación del nixtamal", *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural*, 4, 34, México, DF (1943), 129-134

Johansen, D J y Carlson, D A, "Treatment of potato processing wastes using anaerobic filters", Procs Conference on Environmental Engineering Research, Development and Design, sponsored by the American Society of Civil Engineers, *Universidad de Wáshington*, Seattle (jul 1976)

Katz, S H, Hediger, M L y Valleroy, L A, "Traditional maize processing technique in the new world", *Science* 184, EUA (1974), 765-773

Kornegay, B H, "Modelling and simulation of fixed film biological reactors", en *Mathematical Modeling of Water Pollution Control Processes*, Editor TM Keinath, Ann Arbor Science, Michigan (1975)

Lehninger, A L, *Biochemistry*, Worth Publishers, Inc, Nueva York (1975)

Lehr-und Handbuch der Abwassertechnik. Vol 2, Editorial Wilhelm Ernst und Sohn, Berlín, Múnich, Düsseldorf (1975)

Norouzian, M, "A performance evaluation and kinetics determination of an RBC system operating at the CU wastewater treatment plant", Proyecto 3306, *Instituto de Ingeniería, UNAM* (1983)

O'Melia, C R, "Coagulation in water and wastewater treatment", *Advances in water quality improvement-physical and chemical processes*, Editores Gloyna E F y Eckenfelder, W W Jr, Universidad de Texas, Austin (1970), 219-236

O'Melia, C R, "Coagulation and flocculation", en *Physicochemical processes for water quality control*, Editor Weber, W J Jr, Wiley-Interscience, John Wiley and Sons, Nueva York (1972)

Ramalho, R S, *Introduction to wastewater treatment*, Academic Press, Nueva York, San Francisco, Londres (1977)

Sawyer, C N y McCarty, P L, *Chemistry for environmental engineering*, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd, Tokio (1978)

Trejo González, A, Feria Morales, A y Wild Altamirano, C, "The role of lime in the alkaline treatment of corn for tortilla preparation", *Advances in Chemistry Series*, 189, EUA (1982), 242-263

Van den Berg, L, "Use of anaerobic downflow stationary fixed film reactors for waste treatment and methane production", Simposio Internacional Avances en Digestión Anaerobia, *Universidad Autónoma Metropolitana/Iztapalapa*, México, DF (1982)

Winkler, M A, *Biological treatment of waste-water*, Ellis Horwood Limited, Nueva York, Chichester, Brisbane, Toronto (1981)

Young, J C y McCarty, P L, "The anaerobic filter for waste treatment", *Journal Water Pollution Control Federation*, 41, 5 (1969), R160-R173

Young, J C y Dahab, M F, "Operational characteristics of anaerobic packed-bed reactors", *IV Simposio Biotechnology in Energy Production and Conservation*, Gatlingburg, Tenn (may 1982)

10. RECONOCIMIENTO

La realización de este trabajo fue posible gracias al apoyo proporcionado por las siguientes personas: Ricardo Albarrán, Guillermo Andere, Guadalupe Beltrán, Myrna y Borja, Salustio Faugier, Martha Gómez, Marco A Guerrero, Alfonso Gutiérrez, Sergio Inclán, José L López, Samuel Macías, Ricardo Manzano, Claudia Marmolejo, Ruth Pedroza de B y Yolanda Rivera; también se agradece al Dr Fermín Rivera y al Ing Alejandro Rodríguez sus valiosas asesorías, así como a la Facultad de Química, UNAM, Facultad de Biología, UNAM, Escuela Nacional de Estudios Profesionales-Iztacala y a Industrias Conasupo las facilidades que brindaron a lo largo del desarrollo de esta investigación.

APÉNDICE A

RESULTADOS EXPERIMENTALES

TABLA A-1. RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACION. REACTOR AEROBIO
TOTALMENTE MEZCLADO No 1. $CO = 0.5 \text{ kgDQO/kgSST/d}$

	pH	Temperatura (°C)	Alcalinidad total (mgCaCO ₃ /L)		DQO (mgO ₂ /L)		Sólidos sus- pendidos vo- látiles (mg/L)	Indice vo- lumétrico de lodos (mg/L)	Rapidez de consumo de O ₂ (mgO ₂ /L/min)
			Af.	Ef.	Af.	Ef.			
Agosto	15	7.75	13	-	-	-	2412	-	-
	16	7.8	15	450	700	-	320	-	-
	17	7.8	-	475	700	-	-	-	-
	18	7.65	13	475	700	-	3968	-	-
	19	7.1	13	475	725	-	2040	-	1.318
	22	7.4	12	475	875	-	1689	-	-
	23	7.9	13	475	363	-	2080	-	-
	24	7.4	18	475	600	-	1276	-	-
	25	8.0	15	475	250	-	-	-	-
	26	8.0	16	475	300	-	1468	-	-
	30	7.8	14	475	525	-	4220	-	0.115
	31	7.6	14	475	625	-	-	-	-
Sept.	2	-	-	-	-	17612	299	-	-
	5	7.3	16	1125	925	18209	1194	-	0.024
	6	7.8	-	-	-	-	2855	-	-
	7	8.0	16	1125	550	-	1675	-	-
	8	7.4	16	450	575	19701	2463	-	-
	9	-	20	450	250	-	570	-	-
	12	7.2	18	2200	700	15496	2214	280	0.417
	13	7.2	14	2200	675	-	820	-	-
	14	7.0	17	2200	900	15430	2146	330	0.355
	16	-	-	-	-	-	1650	-	-
	19	6.2	18	2200	1175	16435	2702	390	0.656
	20	7.1	16	2750	475	-	1560	-	-
	21	7.0	16	2575	1550	15941	2066	330	0.371
	23	6.6	14	3400	1550	-	350	-	-

TABLA A-2. RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACION. REACTOR AEROBIO
TOTALMENTE MEZCLADO No 2. $CO = 1.3 \text{ kgDQO/kgSST/d}$

	pH	Temperatura (°C)	Alcalinidad total (mgCaCO ₃ /L)		DQO (mgO ₂ /L)		Sólidos sus- pendidos vo- látiles (mg/L)	Indice vo- lumétrico de lodos (mg/L)	Rapidez de consumo de O ₂ (mgO ₂ /L/min)
			Af.	Ef.	Af.	Ef.			
Agosto	15	7.5	14	-	-	-	3094	-	-
	16	8.0	15	475	725	-	-	-	-
	17	8.0	-	-	-	-	-	-	-
	18	7.5	13	475	725	-	2200	-	-
	19	7.1	13	475	650	-	2200	-	0.193
	22	7.4	12	475	-	-	3315	-	-
	23	7.5	13	475	475	-	2616	-	-
	24	7.5	16	475	675	-	1240	-	-
	25	7.9	15	475	300	-	-	-	-
	26	8.0	16	475	575	-	2168	-	-
	30	8.0	14	475	650	-	6716	-	1.784
	31	7.8	14	475	725	-	-	-	-
Sept.	2	-	-	-	-	17612	896	-	-
	5	8.0	16	1125	675	18206	4179	-	0.489
	6	7.3	-	1125	625	-	640	-	-
	7	7.8	16	-	-	-	680	-	-
	8	8.0	16	450	625	19701	2985	-	-
	9	7.4	20	450	1000	-	615	-	-
	12	7.2	18	2200	1175	15496	3435	940	0.548
	13	7.2	14	2200	800	-	850	-	-
	14	7.0	17	2200	650	15430	2097	980	0.200
	16	-	-	-	-	-	2370	-	-
	19	6.2	18	2200	850	16435	5929	980	3.736
	20	7.1	17	2750	950	-	2680	-	-
	21	7.0	16	2575	1400	15941	2952	350	3.45
	23	6.6	14	3400	1400	-	2380	-	-

TABLA A-3. RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACION. REACTOR AEROBIO
TOTALMENTE MEZCLADO No 3. $CO = 2.2 \text{ kgDQO/kgSST/d}$

	pH	Temperatura (°C)	Alcalinidad total (mgCaCO ₃ /ℓ)		DQO (mgO ₂ /ℓ)		Sólidos sus- pendidos vo- látiles (mg/ℓ)	Indice vo- lumétrico de lodos (mℓ/g)	Rapidez de consumo de O ₂ (mgO ₂ /ℓ/min)
			Af.	Ef.	Af.	Ef.			
Agosto 15	7.7	14	-	-	-	-	3024	-	-
16	7.3	14	450	825	-	-	2490	-	-
17	7.3	-	475	825	-	-	-	-	-
18	7.8	13	475	825	-	-	1956	-	-
19	7.2	13	475	650	-	-	1956	-	0.974
22	7.1	12	475	650	-	-	3137	-	-
23	7.5	13	475	650	-	-	-	-	-
24	7.7	15	475	850	-	-	1588	-	-
25	7.7	15	475	950	-	-	-	-	-
26	8.0	16	475	475	-	-	1116	-	-
30	7.9	14	475	925	-	-	3993	-	2.371
31	7.9	14	475	825	-	-	-	-	-
Sept. 2	-	-	-	-	17612	2687	1388	-	-
5	7.6	16	1125	925	18209	3881	1590	-	0.203
6	7.3	-	-	-	-	-	1980	-	-
7	6.9	16	1125	1175	-	-	3905	-	-
8	7.2	17	450	1725	19701	6343	2140	-	-
9	7.5	20	450	950	-	-	890	-	-
12	7.2	18	2200	1600	15496	3740	3240	1000	0.504
13	7.1	14	2200	775	-	-	1360	-	-
14	6.3	17	2200	625	15430	5993	610	120	0.725
16	-	-	-	-	-	-	2200	-	-
19	7.0	17	2200	1300	16435	5854	2370	990	3.780
20	7.1	17	2750	1025	-	-	2840	-	-
21	7.1	16	2575	1175	15941	3469	2800	990	1.52
23	7.1	14	3400	1175	-	-	2390	-	-

TABLA A-4. RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACION. REACTOR AEROBIO
TOTALMENTE MEZCLADO No 4. $CO = 3.0 \text{ kgDQO/kgSST/d}$

	pH	Temperatura (°C)	Alcalinidad total (mgCaCO ₃ /ℓ)		DQO (mgO ₂ /ℓ)		Sólidos sus- pendidos vo- látiles (mg/ℓ)	Indice vo- lumétrico de lodos (mℓ/g)	Rapidez de consumo de O ₂ (mgO ₂ /ℓ/min)
			Af.	Ef.	Af.	Ef.			
Agosto 15	7.3	14	-	-	-	-	2904	-	-
16	7.3	15	450	850	-	-	3960	-	-
17	7.3	-	475	850	-	-	-	-	-
18	7.5	13	475	850	-	-	-	-	-
19	6.7	13	475	850	-	-	1912	-	1.4
22	7.0	12	475	425	-	-	1443	-	-
23	7.4	13	475	463	-	-	2352	-	-
24	7.5	15	475	575	-	-	1232	-	-
25	7.7	15	475	350	-	-	-	-	-
26	7.5	16	475	1100	-	-	-	-	-
30	7.8	14	475	995	-	-	3198	-	0.429
31	7.9	14	475	1200	-	-	-	-	-
Sept. 2	-	-	-	-	17612	2985	2390	-	-
5	7.5	16	1125	925	18209	2985	1760	-	0.014
6	7.3	-	-	-	-	-	2335	-	-
7	7.1	16	1125	1150	-	-	1755	-	-
8	7.4	17	450	1150	19702	6119	2500	-	-
9	7.4	20	450	550	-	-	1495	-	-
12	7.1	18	2200	1900	15496	7863	2510	990	0.860
13	6.8	14	2200	1125	-	-	1620	-	-
14	6.7	17	2200	950	15430	5393	960	970	0.773
16	-	-	-	-	-	-	480	-	-
19	6.8	18	2200	1550	16435	6379	1330	990	1.350
20	7.0	17	2750	1100	-	-	2680	-	-
21	7.0	16	2575	2000	15941	5166	3440	990	1.440
23	7.0	14	3400	2000	-	-	2500	-	-

TABLA A-5. MEDICIONES EN EL REACTOR ANAEROBIO TOTALMENTE MEZCLADO No 1.
 $\theta_H = 5$ días

	pH	Alcalinidad total (mgCaCO ₃ /ℓ)		DQO (mgO ₂ /ℓ)		Sólidos suspendidos volátiles (mg/ℓ)	Cant. gases producidos (mℓ/d)	Composición de gases %	
		Af.	Ef.	Af.	Ef.			CH ₄	CO ₂
Agosto 15	7.3	-	-	-	-	-	290	-	-
16	-	-	-	-	-	-	930	-	-
17	-	-	-	-	-	-	710	-	-
18	6.5	-	-	-	-	-	850	-	-
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	6.9	-	-	-	-	-	-	-	-
23	6.8	650	1850	6907	6323	1200	1000	-	-
24	6.2	-	-	-	-	-	740	-	-
25	6.3	-	-	-	-	-	980	-	-
26	6.4	-	-	6907	6602	1090	980	-	-
30	7.5	475	2850	5426	8450	450	800	-	-
31	7.0	-	-	-	-	-	910	-	-
Sept. 2	7.1	-	-	-	-	-	-	-	-
5	6.0	-	-	-	-	-	-	-	-
6	6.3	-	-	-	-	-	980	-	-
7	-	-	-	-	-	-	640	-	-
8	6.0	-	-	-	-	-	560	-	-
9	7.0	-	-	-	-	-	940	-	-
12	7.1	-	-	-	-	-	940	-	-
13	6.5	-	-	-	-	-	940	40	60
14	7.0	-	-	-	-	-	0	-	-
16	6.7	450	2700	6341	7617	110	200	-	-
19	6.0	-	-	-	-	-	420	-	-
20	6.0	475	1400	6316	5564	2334	590	-	-
21	6.0	-	-	-	-	-	200	-	-
23	6.6	325	2800	6307	5208	2334	190	39	61

TABLA A-6. MEDICIONES EN EL REACTOR ANAEROBIO TOTALMENTE MEZCLADO No 2.
 $\theta_H = 10$ días

	pH	Alcalinidad total (mgCaCO ₃ /ℓ)		DQO (mgO ₂ /ℓ)		Sólidos suspen- didos volátiles (mg/ℓ)	Cant. gases producidos (mℓ/d)	Composición de gases %	
		Af.	Ef.	Af.	Ef.			CH ₄	CO ₂
Agosto 15	7.1	-	-	-	-	-	20	-	-
16	-	-	-	-	-	-	50	-	-
17	6.7	-	-	-	-	-	180	-	-
18	6.0	-	-	7140	6712	-	80	-	-
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	5.8	-	-	-	-	-	-	-	-
23	5.3	650	475	6907	6595	1070	160	-	-
24	5.9	-	-	-	-	-	0	-	-
25	6.5	-	-	-	-	-	10	-	-
26	6.8	-	-	-	-	1700	20	-	-
30	7.7	-	-	-	-	-	0	-	-
31	7.4	-	-	-	-	-	270	-	-
Sept. 2	7.6	-	-	-	-	-	-	-	-
5	7.6	-	-	-	-	-	10	-	-
6	7.3	-	-	-	-	-	10	-	-
7	-	-	-	-	-	-	10	-	-
8	7.0	-	-	-	-	-	40	-	-
9	7.4	-	-	-	-	-	0	-	-
12	7.2	-	-	-	-	-	0	-	-
13	6.8	-	-	-	-	-	0	45	55
14	7.5	-	-	-	-	-	0	-	-
16	6.9	450	4530	6341	6229	330	30	-	-
19	6.4	-	-	-	-	-	130	-	-
20	6.6	475	3425	6316	5602	1700	40	-	-
21	6.5	-	-	-	-	-	40	-	-
23	7.1	325	4000	6307	5246	1700	130	59	41

TABLA A-7. MEDICIONES EN EL REACTOR ANAEROBIO TOTALMENTE MEZCLADO No 3.
 $\theta_H = 15$ días

	pH	Alcalinidad total (mgCaCO ₃ /ℓ)		DQO (mgO ₂ /ℓ)		Sólidos suspen- didos volátiles (mg/ℓ)	Cant. gases producidos (mℓ/d)	Composición de gases %	
		Af.	Ef.	Af.	Ef.			CH ₄	CO ₂
Agosto 15	7.5	-	-	-	-	-	150	-	-
16	7.2	525	2525	6824	5333	-	280	-	-
17	6.9	-	-	-	-	1825	490	58	42
18	6.7	540	2400	7140	4883	2005	280	-	-
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	6.9	-	-	-	-	-	-	-	-
23	6.5	-	-	6907	5039	1300	270	-	-
24	6.6	-	-	-	-	-	400	-	-
25	6.5	-	-	-	-	-	-	-	-
26	6.8	-	-	6907	4531	-	-	-	-
30	7.2	475	2850	5426	4531	1180	-	-	-
31	6.3	-	-	-	-	-	30	-	-
Sept. 2	6.3	475	1825	5000	4701	1970	-	-	-
5	6.3	-	-	-	-	-	120	-	-
6	6.5	450	3000	5231	3538	1750	200	-	-
7	-	-	-	-	-	-	140	-	-
8	6.4	-	-	-	-	-	210	-	-
9	7.2	600	4225	5899	5169	1640	510	-	-
12	6.7	-	-	-	-	-	210	-	-
13	6.7	550	3175	5992	4351	-	70	66	34
14	7.1	-	-	-	-	-	250	-	-
16	7.0	450	2775	6341	4503	950	220	-	-
19	6.6	-	-	-	-	-	240	-	-
20	6.9	475	2675	6316	3008	2722	620	-	-
21	6.7	-	-	-	-	-	370	-	-
23	7.2	325	3075	6307	1932	2722	330	57	43

TABLA A-8. MEDICIONES EN EL REACTOR ANAEROBIO TOTALMENTE MEZCLADO No 4.
 $\theta_H = 20$ días

	pH	Alcalinidad total (mgCaCO ₃ /d)		DQO (mgO ₂ /ℓ)		Sólidos suspen- didos volátiles (mg/ℓ)	Cant. gases producidos (mℓ/d)	Composición de gases %	
		Af.	Ef.	Af.	Ef.			CH ₄	CO ₂
Agosto 15	6.6	-	-	-	-	-	70	-	-
16	-	-	-	-	-	-	20	-	-
17	6.3	-	-	-	-	-	140	-	-
18	6.4	540	1760	-	-	-	170	-	-
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	6.3	-	-	-	-	-	-	-	-
23	7.4	650	1760	-	-	-	70	-	-
24	6.1	-	-	-	-	-	10	-	-
25	6.4	-	-	-	-	-	0	-	-
26	6.9	-	-	-	-	-	270	-	-
30	7.1	-	-	-	-	-	10	-	-
31	6.7	-	-	-	-	-	0	-	-
Sept. 2	6.9	-	-	-	-	-	-	-	-
5	6.9	-	-	-	-	-	200	-	-
6	6.7	-	-	-	-	-	270	-	-
7	-	-	-	-	-	-	30	-	-
8	6.5	-	-	-	-	-	130	-	-
9	7.0	-	-	-	-	-	230	-	-
12	7.0	-	-	-	-	-	0	-	-
13	6.8	-	-	-	-	-	20	36	64
14	7.0	-	-	-	-	-	0	-	-
16	7.0	450	4250	6341	8218	1040	0	-	-
19	6.5	-	-	-	-	-	70	-	-
20	6.8	475	4250	6316	7932	1640	80	-	-
21	6.6	-	-	-	-	-	0	-	-
23	6.8	325	4450	6307	8807	1640	0	-	-

TABLA A-9. MEDICIONES DE LA PRIMERA CARGA ORGANICA EN EL REACTOR ANAEROBIO EMPACADO. $Q = 1\ 223\ \text{mL/d}$

Reactor No.	Punto de muestreo	Volumen (l)	Tiempo de retención (d)	Superficie expuesta (m^2)	Carga orgánica volumétrica (mgDQO/l d)	pH	DQO (mgO_2/l)	Alcalinidad (mgCaCO_3/l)
1	1	0	0	0		8.3	2057	353
	2	1.15	0.94	0.288	2120	6.5	320	496
2	3	2.30	1.88	0.456	1980	6.7	312	496
	4	3.48	2.82	0.684	1696	6.8	280	476
3	5	4.60	3.76	0.912	1884	6.8	248	496
	6	5.75	4.70	1.140	1272	6.8	272	496
4	7	6.90	5.64	1.368	1060	6.9	248	504
	8	8.05	6.58	1.596	848	6.8	248	504
5	9	9.20	7.52	1.824	636	6.9	240	516
	10	10.35	8.46	2.052	424	6.9	216	536
	11	11.50	9.40	2.280	212	6.9	176	500

TABLA A-10. MEDICIONES DE LA SEGUNDA CARGA ORGANICA EN EL REACTOR ANAEROBIO EMPACADO. $Q = 2\ 300\ \text{mL/d}$

Reactor No.	Punto de muestreo	Volumen (l)	Tiempo de retención (d)	Superficie expuesta (m^2)	Carga orgánica volumétrica (mgDQO/l d)	pH	DQO (mgO_2/l)	Alcalinidad (mgCaCO_3/l)
1	1	0	0	0	-	11	6500	1100
	2	1.15	0.5	0.228	13000	5.2	4600	400
2	3	2.30	1.0	0.456	11700	5.9	3140	800
	4	3.45	1.5	0.684	10400	6.1	1960	1240
3	5	4.60	2.0	0.912	9100	6.5	1080	1580
	6	5.75	2.5	1.140	7800	6.4	840	1640
4	7	6.90	3.0	1.368	6500	6.6	720	1600
	8	8.05	3.5	1.596	5200	6.4	640	1640
5	9	9.20	4.0	1.824	3900	6.6	600	1620
	10	10.35	4.5	2.052	2600	6.6	600	1640
	11	11.50	5.0	2.280	1300	6.8	600	1500

TABLA A-11. MEDICIONES DE LA TERCERA CARGA ORGANICA EN EL REACTOR ANAEROBIO EMPACADO. $Q = 3\ 884\ \text{mL/d}$

Reactor No.	Punto de muestreo	Volumen (l)	Tiempo de retención (d)	Superficie expuesta (m^2)	Carga orgánica volumétrica (mgDQO/l d)	pH	DQO (mgO_2/l)	Alcalinidad (mgCaCO_3/l)
1	1	0	0	0		11.9	4500	900
	2	1.15	0.33	0.228	13636	6.7	2737	1000
2	3	2.30	0.66	0.456	12272	6.7	1610	1075
	4	3.45	0.99	0.684	10909	6.9	678	1150
3	5	4.60	1.32	0.912	9545	7.0	508	1200
	6	5.75	1.65	1.140	8182	7.0	466	1225
4	7	6.90	1.98	1.368	6818	7.1	466	1250
	8	8.05	2.31	1.596	6455	7.0	381	1225
5	9	9.20	2.64	1.824	4091	7.2	508	1225
	10	10.35	2.97	2.052	2727	7.3	339	1225
	11	11.50	3.30	2.280	1364	7.0	424	1225

TABLA A-12. MEDICIONES EN LA PRIMERA ETAPA EXPERIMENTAL EN EL CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATORIO

Cámara	OD (mg/l)	T (°C)	pH	Conductividad (umhos/cm)	Turbiedad (NTU)	Alcalinidad (CaCO ₃ /l)	DQO (mgO ₂ /l)	DBO ₅ (mgO ₂ /l)	Sólidos mg/l			Nitrógeno Kjeldahl mg/l		
									Tot.	Susp.	Dis.	Tot.	Dis.	Susp.
Afluente	-	-	6.05	1815	-	380	4,266	1,275	-	-	-	3	-	-
1	2.70	13	6.62	1570	56	260	2,756	975	3,600	860	2,740	83	40	43
2	2.74	13	7.17	1550	59	300	2,582	1,013	4,532	1562	2,970	88	36	52
3	2.73	13	7.25	1450	80	350	2,468	638	4,852	1762	3,090	152	38	114
4	3.15	13	7.32	1350	100	350	2,291	375	3,680	200	3,480	131	51	80
5	3.67	13	7.38	1190	125	360	2,270	300	3,532	252	3,280	56	47	9
6	3.65	13	7.41	1370	130	350	2,257	285	3,844	454	3,390	62	28	34
7	3.64	13	7.39	1340	145	350	2,230	375	3,528	298	3,230	56	29	27
8	3.86	13	7.37	1280	155	340	2,206	300	4,040	540	3,500	66	29	37
9	3.57	13	7.33	1200	270	350	2,301	375	3,848	558	3,280	47	24	23
10	3.02	13	7.23	1150	275	340	2,225	262	5,002	1968	3,034	134	39	95

TABLA A-13. MEDICIONES EN LA SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL EN EL CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATORIO

Cámara	OD (mg/l)	T (°C)	pH	Conductividad (umhos/cm)	Alcalinidad (mgCaCO ₃ /l)	DQO (mgO ₂ /l)	DBO ₅ (mgO ₂ /l)	Sólidos (mg/l)			Nitrógeno Kjeldahl (mg/l)		
								Tot.	Susp.	Dis.	Tot.	Susp.	Sol.
Afluente	-	-	5.8	1 400	-	6 525	1 575	4 710	-	-	70.5	-	-
1	3.2	12	6.3	1 450	75	4 814	1 200	4 548	1 472	3 076	83.9	25.7	58.1
2	4.4	12	7.0	1 500	150	4 400	1 200	4 408	1 536	2 872	67.8	11.8	56.0
3	3.9	12	7.0	1 300	350	4 333	1 080	6 911	5 767	1 143	214.1	159.8	34.3
4	4.1	11.5	7.2	1 400	375	4 283	862	6 562	1 908	4 654	179.5	131.1	48.3
5	4.6	11.5	7.7	1 500	450	3 963	900	4 498	3 001	1 496	59.0	11.3	47.7
6	4.9	11.7	7.7	1 350	450	3 800	750	4 205	2 149	2 055	58.9	12.6	46.3
7	4.2	12	7.7	1 450	500	3 700	450	5 173	1 539	3 643	73.2	27.9	45.3
8	2.9	12	7.4	1 300	500	3 600	300	13 087	9 079	4 007	288.0	242.3	45.7
9	2.5	11.5	7.4	1 300	550	3 550	263	14 137	10 663	3 474	279.0	229.7	49.3
10	2.3	13	7.4	1 300	550	3 403	225	13 123	7 692	5 431	282.4	238.4	44.0

TABLA A-14. MEDICIONES EN LA TERCERA ETAPA EXPERIMENTAL EN EL CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATORIO

Comportamiento	OD (mg/l)	Temp. (°C)	pH	Conductividad (µmhos/cm)	Alcalinidad (mgCaCO ₃ /l)	DQO (mgO ₂ /l)	DBO ₅ (mgO ₂ /l)	Sólidos suspendidos (mg/l)	Nitrógeno Kjeldahl Susp. (mg/l)
Afluente	-	11.2	6.1	1500	200	6406	1970	-	-
1	3.2	11.5	6.4	1470	240	3141	1503	1150	201.3
2	2.5	12.7	6.4	1420	340	2267	1320	1246	210.3
3	3.2	12.0	6.4	1440	420	1976	1064	3740	239.7
4	3.6	11.7	6.7	1400	560	1725	831	7235	1248.0
5	4.3	11.6	6.7	1350	600	1667	630	6270	256.2
6	4.4	12.0	6.7	1310	580	1567	320	4357	265.1
7	4.5	12.7	6.7	1300	560	1396	218	4425	287.0
8	4.6	13.0	6.8	1230	740	1357	174	2692	295.0
9	3.8	13.0	6.9	1200	920	1218	103	4380	303.0
10	4.2	13.0	6.7	1170	880	985	75	6625	312.0

TABLA A-15. CONDICIONES BAJO LAS QUE SE REALIZO LA PRUEBA DE JARRAS Y SUS RESULTADOS UTILIZANDO UNA AYUDA COAGULANTE PARA EL NEJAYOTE

Jarra	Concentración de ayuda coagulante (mg/l)	Concentración de Al^{+++} (mg/l)	pH nejayote	pH mezcla	Aparición de flóculos	Remoción de turbiedad (%)	Remoción de DQO (%)
1	5	1.0	6	6.1	no	0.0	0.0
2	500	1.0	6	6.0	poco	0.0	7.7
3	5	1.0	12	11.0	no	6.7	0.0
4	500	1.0	12	11.0	poco	0.0	8.4
5	5	9.0	6	6.0	bueno	37.0	19.8
6	500	9.0	6	5.8	poco	49.0	3.5
7	5	9.0	12	10.8	poco	20.3	6.5
8	500	9.0	12	10.6	bueno	52.0	10.5
9	275	5.0	9	8.3	bueno	40.6	11.7
10	275	5.0	9	8.8	bueno	45.7	12.9
11	275	5.0	9	8.5	bueno	40.6	12.3

TABLA A-16. CONDICIONES BAJO LAS QUE SE REALIZO LA SEGUNDA CORRIDA Y SUS RESULTADOS UTILIZANDO AYUDA COAGULANTE PARA EL NEJAYOTE

Jarra	Concentración de ayuda coagulante (mg/l)	Concentración de Al^{+++} (mg/l)	pH nejayote	pH mezcla	Aparición de flóculos	Remoción de turbiedad (%)	Remoción de DQO (%)
1	5	1.0	9	9	no	66	-
2	200	1.0	9	9	poco	53	15.4
3	5	1.0	11	11	poco	49	15.4
4	200	1.0	11	11	bueno	52	23.0
5	5	17.0	9	9	poco	32	7.7
6	200	17.0	9	9	bueno	51	23.0
7	5	17.0	11	11	bueno	24	15.4
8	200	17.0	11	11	bueno	61	7.7
9	125	9.0	10	10	bueno	71	15.4
10	125	9.0	10	10	excelente	72	15.4
11	125	9.0	10	10	excelente	-	15.4

TABLA A-17. CONDICIONES Y RESULTADOS DE LA PRIMERA CORRIDA PARA LOS EFLUENTES DEL REACTOR ANAEROBIO EMPACADO UTILIZANDO AYUDA COAGULANTE

Jarra	Concentración de ayuca coagulante (mg/l)	Concentración de Al^{+++} (mg/l)	pH nejayote	Aparición de flóculos	Remoción de turbiedad (%)	Remoción de DQO (%)
1	5	6.0	7	poco	0	10
2	200	6.0	7	poco	0	0
3	5	6.0	11	bueno	75	10
4	200	6.0	11	bueno	70	0
5	5	11.0	7	poco	0	19
6	200	11.0	7	muy bueno	0	6
7	5	11.0	11	poco	75	6
8	200	11.0	11	poco	75	0
9	125	9.0	9	poco	58	0
10	125	9.0	9	poco	60	0
11	125	9.0	9	poco	58	0

TABLA A-18. CONDICIONES Y RESULTADOS DE LA SEGUNDA CORRIDA PARA LOS EFLUENTES DEL REACTOR ANAEROBIO EMPACADO UTILIZANDO AYUDA COAGULANTE

Jarra	Concentración de ayuca coagulante (mg/l)	Concentración de Al^{+++} (mg/l)	pH Agua Tratada	pH mezcla	Aparición de flóculos	Remoción de turbiedad (%)	Remoción de DQO (%)
1	10	20	7.5	6.8	no	0	0
2	5	30	7.5	6.5	bueno	6	31
3	5	40	7.5	6.3	bueno	8	41
4	10	30	7.5	6.5	excelente	11	31
5	10	40	7.5	6.2	excelente	13	37

TABLA A-19 CONDICIONES Y RESULTADOS DE LA COAGULACION DEL EFLUENTE DEL SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS UTILIZANDO SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE Y SEPARAN COMO AYUDA COAGULANTE

Jarra	Concentración de ayuda coagulante (mg/l)	Concentración de Al^{+++} (mg/l)	pH nejayote tratado	DQO inicial (mgO ₂ /l)	DQO final (mgO ₂ /l)	Remoción de DQO (%)
1	5	10	7	750	240	68
2	15	10	7	750	400	47
3	5	10	9	750	640	15
4	15	10	9	750	520	30
5	5	20	7	750	160	79
6	15	20	7	750	-	-
7	5	20	9	750	-	-
8	15	20	9	750	320	57
9	10	15	8	750	183	76
10	10	15	8	750	225	70
11	10	15	8	750	196	74

APÉNDICE B

DISEÑO BÁSICO DE UNA PLANTA PILOTO
PARA EL TRATAMIENTO DEL NEJAYOTE

B.1 Descripción del proceso

La fig B.1 muestra las características generales de las unidades que integran la planta piloto propuesta.

Del canal de drenaje pasa el nejayote a una caja derivadora (CD), la cual también sirve para homogeneizar el nejayote; después pasa a una laguna de enfriamiento, con una configuración tal que permite la extracción en diferentes posiciones que correspondan a diferentes tiempos de retención hidráulica y al mismo tiempo a diversas temperaturas. Debido a los largos tiempos de retención hidráulica se presentarán en la laguna dos efectos principales, además de la reducción de la temperatura: a) sedimentación de los sólidos suspendidos y b) disminución del pH por absorción de CO_2 atmosférico.

Después de un ajuste del pH en líneas separadas pasa el nejayote a los dos sistemas biológicos de tratamiento: a) lodos activados (LA) y b) filtro anaerobio (RAE). El de lodos activados cuenta con un tanque de aeración y con sedimentación secundaria (SS). El reactor anaerobio empacado cuenta, además del reactor, con un colector de gases.

El nejayote tratado en los sistemas biológicos pasa a la unidad de coagulación-floculación, la cual cuenta con a) tanque de mezcla rápida donde se adicionan los reactivos, b) tanque de floculación o mezclado lento y c) sedimentador para separar los flóculos del agua tratada.

El agua que sale de la última etapa deberá tener valores de DQO menores a 300 mg/l y puede ser utilizada nuevamente en el proceso del nixtamal.

B.2 Bases de diseño

Con base en los resultados del Cap 7 se considera que el nejayote sale de la planta nixtamalizadora con un valor de DQO de 6 500 mg/l.

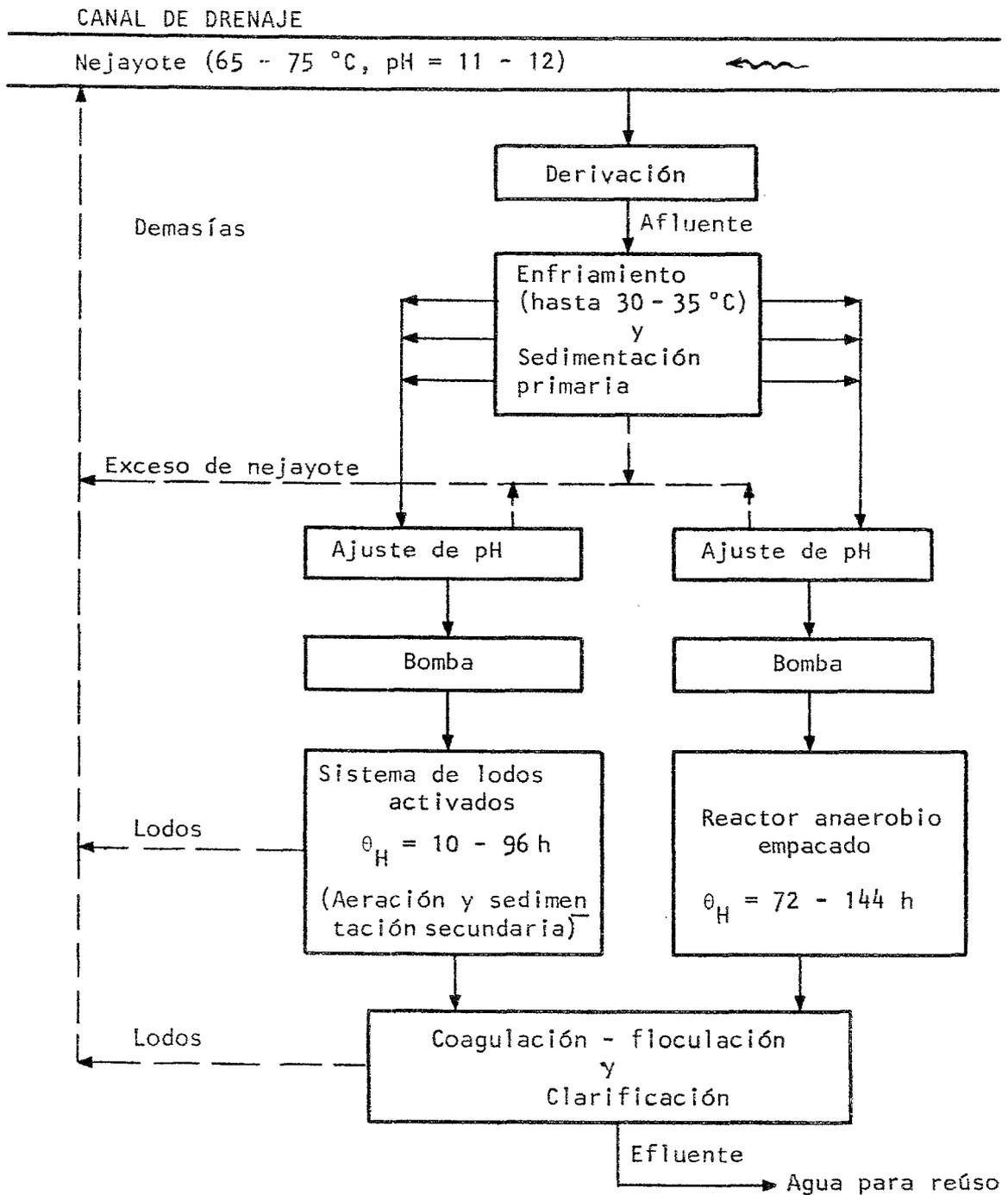


Fig B.1 Planta piloto

B.2.1 Diseño del sistema de lodos activados

Al ser la planta piloto de tipo experimental, el gasto de diseño debe ser variable y se fija entre 5 y 50 ml/s (432-4320 l/d).

Con los resultados experimentales de las tablas A-1 a A-4, y utilizando el método descrito por Eckenfelder (1970) y por Ramalho (1977) se calculan los parámetros cinéticos de diseño:

- k constante de consumo de sustrato = 3.8×10^{-4} 1/mgSSV d
- a coeficiente de rendimiento = 0.209 mgSSV/mgDQO
- b coeficiente de decaimiento endógeno ≈ 0 mgSSV/mgSSV d
- a' coeficiente de consumo de oxígeno por funciones catabólicas = 0.172 kgO₂/kgDQO
- b' coeficiente de consumo de oxígeno por decaimiento endógeno = 0.160 kgO₂/kgSSV d

Las características del sistema son (Cap B.3):

- Tanque de aeración

Gasto	5 a 50 ml/s
Tiempo de retención	10 a 92 h
Volumen útil	4.0 m ³
- Sedimentación secundaria

Considerando una carga de 0.5 m/h se proponen cuatro tanques se dimentadores idénticos, operados en paralelo, cada uno con una superficie de sedimentación de 0.09 m², de forma cilíndrica con una altura de 75 cm, diámetro de 35 cm y un cono de 60° con al tura de 22 cm. Se proponen cuatro tanques para evitar tiempos de retención hidráulica muy largos o muy cortos en caso de tener

un solo tanque. En esta forma es posible operar el sistema con el número de tanques que sea conveniente para un gasto determinado. El volumen útil de cada sedimentador es 67.5ℓ. La recirculación de lodos es de 66 por ciento según diseño.

B.2.2 Reactor anaerobio empacado

Utilizando los datos de las tablas A-9 a A-11 y el método de diseño de Young, *et al* (1982) se obtienen los coeficientes de diseño:

$$\theta \text{ coeficiente del reactor} = 0.003 \text{ d/cm}$$

$$\theta_T \text{ coeficiente de proporcionalidad} = 0.37 \text{ d}$$

Con anillos Pall de 9 cm como material de empaque ($\alpha = 0.94$) y un gasto de nejayote de 5 ml/s se tiene que la altura requerida para el reactor es de 125 cm, además, considerando un 50 por ciento en exceso por seguridad se alcanza una altura del material de empaque de 190 cm para un tiempo de retención hidráulica de 5.7 días (Cap B.3)

B.2.3 Laguna de enfriamiento

Se diseñó de tal forma que pueda manejar un gasto de 100 ml/s, lo cual comprende los requerimientos de los dos sistemas de tratamiento biológico. El exceso de nejayote puede ser desechado (Cap B.3).

Gasto	100	ml/s
Tiempo de retención	2	días
Volumen útil	17.3	m ³
Longitud	34.5	m

B.2.4 Coagulación-floculación

Este sistema se diseña de tal forma que pueda ser conectado en serie a cualquiera de los dos sistemas biológicos y no a los dos en forma simultánea.

- Tanque de mezclado rápido

Gasto	12.5 ml/s
Tiempo de retención	3.5 min
Volumen útil	2.62 ℓ

- Tanque de floculación

Gasto	12.5 ml/s
Tiempo de retención	20 min
Volumen útil	15 ℓ

- Clarificador

Tiene las mismas características que los sedimentadores del sistema de lodos activados

B.3 Diseño de la planta piloto (figs B.2 a B.8)

En este Capítulo se presentan diagramas y planos del diseño que contienen información general sobre dimensiones del equipo, tuberías y accesorios e información de niveles y perfil hidráulico. Asimismo, se presenta la alternativa de tratamiento mediante los procesos de lodos activados en el tanque de aeración y con el reactor anaerobio empacado.

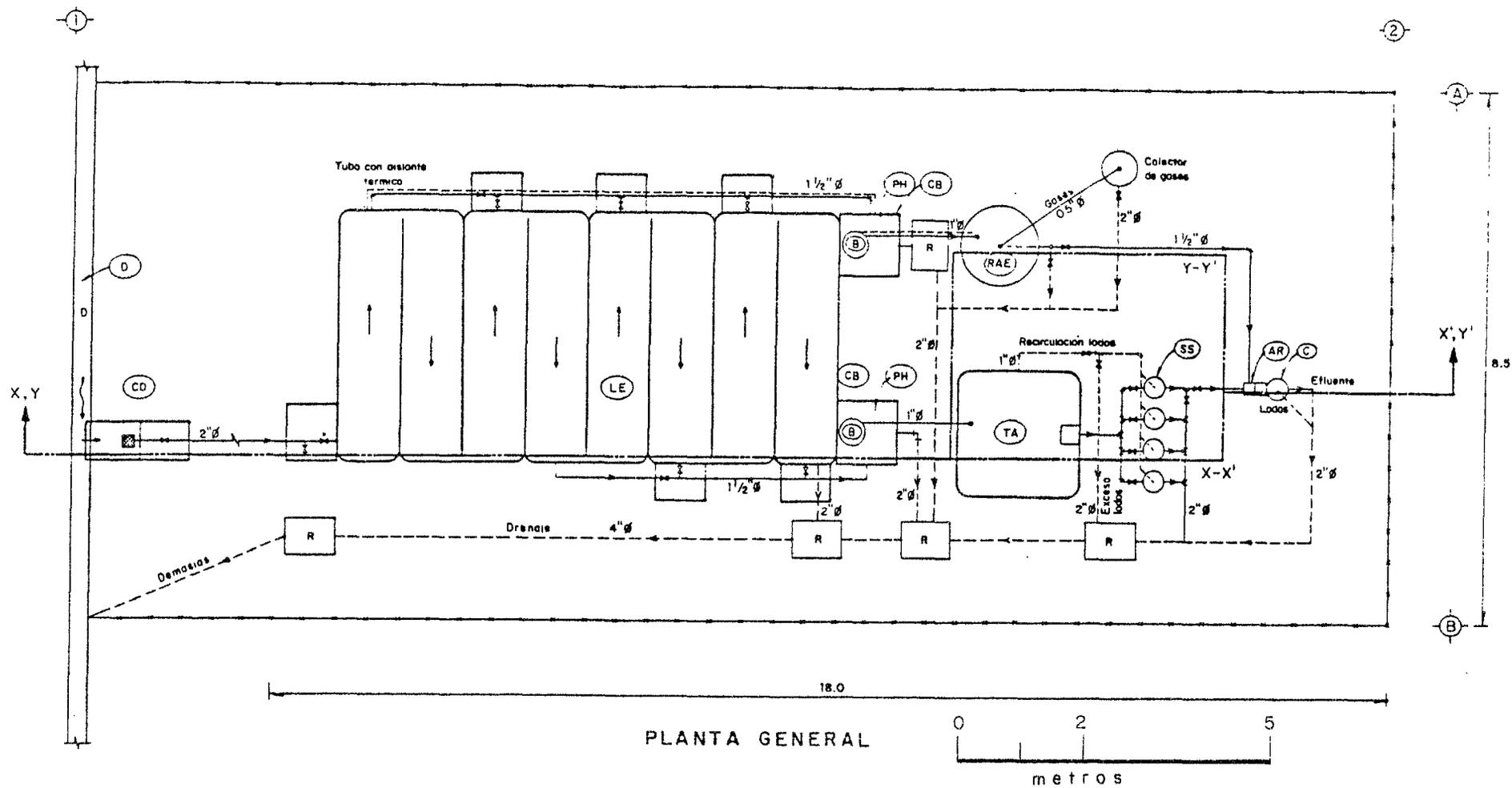
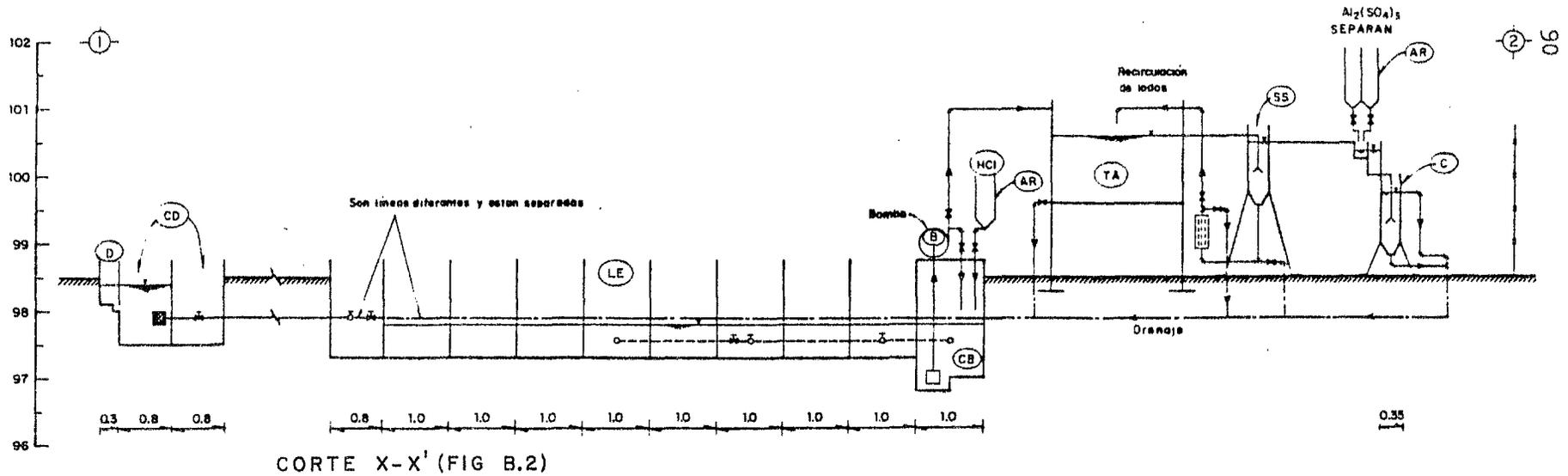
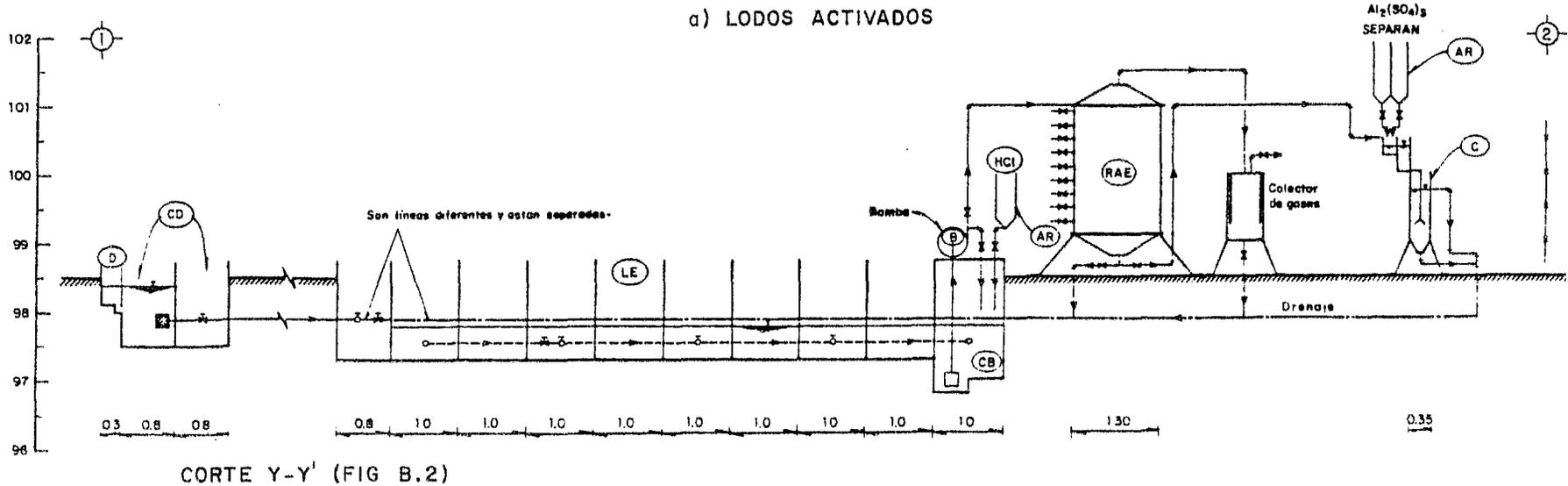


Fig B.2 Planta piloto para tratamiento de desechos líquidos en el proceso del nixtamal

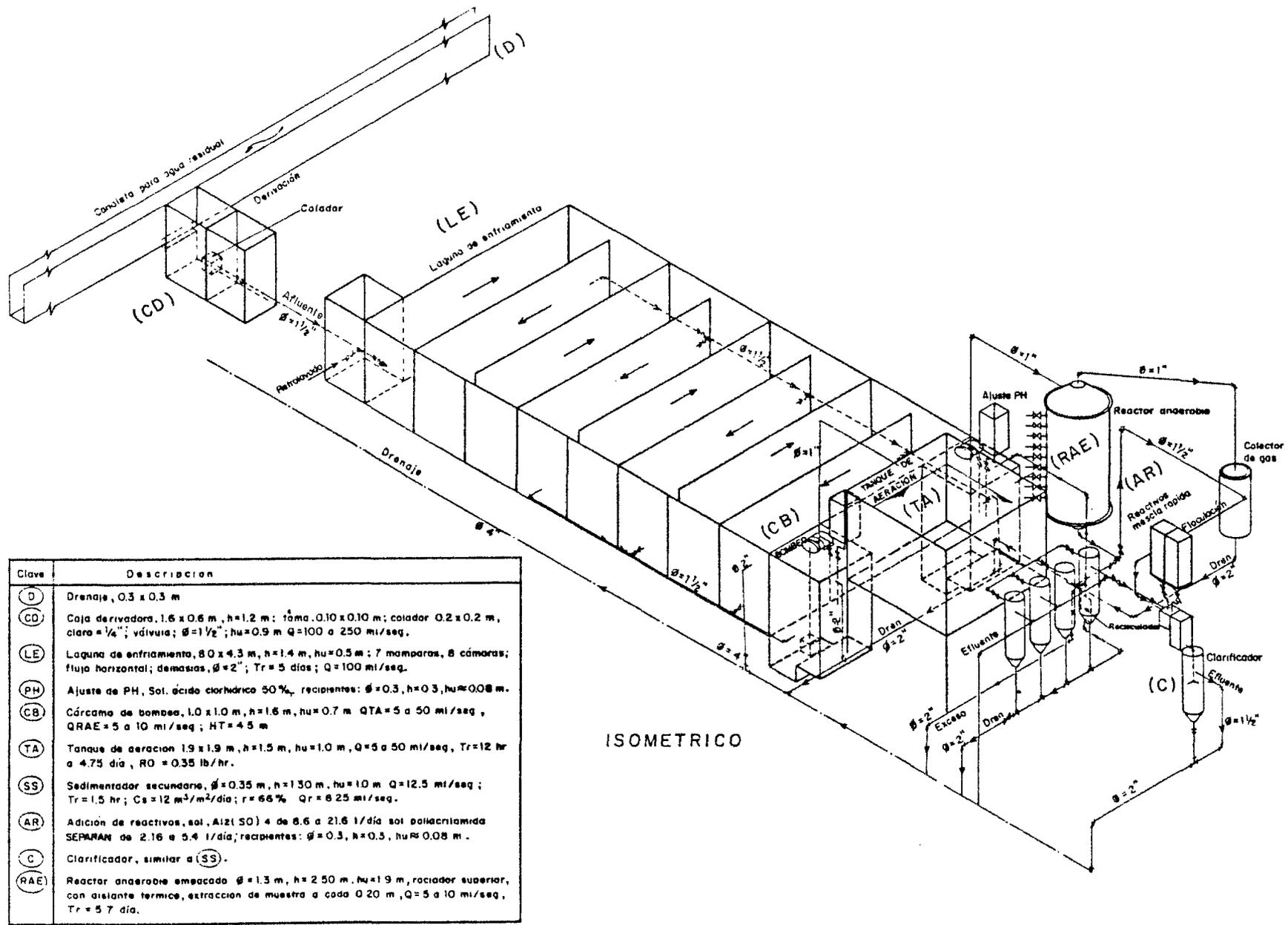


a) LODOS ACTIVADOS



b) REACTOR ANAEROBIO

Fig B.3 Alternativa de tratamiento en la planta piloto



Clave	Descripción
(D)	Drenaje, 0.3 x 0.3 m
(CD)	Caja derivadora, 1.6 x 0.6 m, h=1.2 m; toma 0.10 x 0.10 m; colador 0.2 x 0.2 m, claro = 1/4"; válvula; $\phi = 1\frac{1}{2}"$; hu=0.9 m Q=100 a 250 ml/seg.
(LE)	Laguna de enfriamiento, 8.0 x 4.3 m, h=1.4 m, hu=0.5 m; 7 mamparas, 8 cámaras; flujo horizontal; demasas, $\phi = 2"$; Tr = 5 días; Q=100 ml/seg.
(PH)	Ajuste de PH, Sol. ácido clorhídrico 50%, recipientes: $\phi = 0.3$, h=0.3, hu=0.08 m.
(CB)	Cámara de bombeo, 1.0 x 1.0 m, h=1.6 m, hu=0.7 m QTA=5 a 50 ml/seg, QRAE=5 a 10 ml/seg; HT=4.5 m
(TA)	Tanque de aeración 1.9 x 1.9 m, h=1.5 m, hu=1.0 m, Q=5 a 50 ml/seg, Tr=12 hr a 4.75 día, RO = 0.35 lb/hr.
(SS)	Sedimentador secundario, $\phi = 0.35$ m, h=1.30 m, hu=1.0 m Q=12.5 ml/seg; Tr=1.5 hr; Cs=12 m ³ /m ² /día; r=66% Qr=8.25 ml/seg.
(AR)	Adición de reactivos, sol. Al ₂ (SO) ₄ de 8.6 a 21.6 l/día sol poliacrilamida SEPARAN de 2.16 a 5.4 l/día; recipientes: $\phi = 0.3$, h=0.3, hu=0.08 m.
(C)	Clarificador, similar a (SS).
(RAE)	Reactor anaerobio smeacada $\phi = 1.3$ m, h=2.50 m, hu=1.9 m, raciador superior, con aislante térmico, extracción de muestra a cada 0.20 m, Q=5 a 10 ml/seg, Tr = 5.7 día.

Notas: A cotaciones en m, niveles en m, diámetro de tuberías en pulgadas.
 La referencia de los niveles es arbitraria.
 La ubicación precisa de la planta piloto se dará en sitio.

Fig B.4 Datos básicos de las unidades de proceso

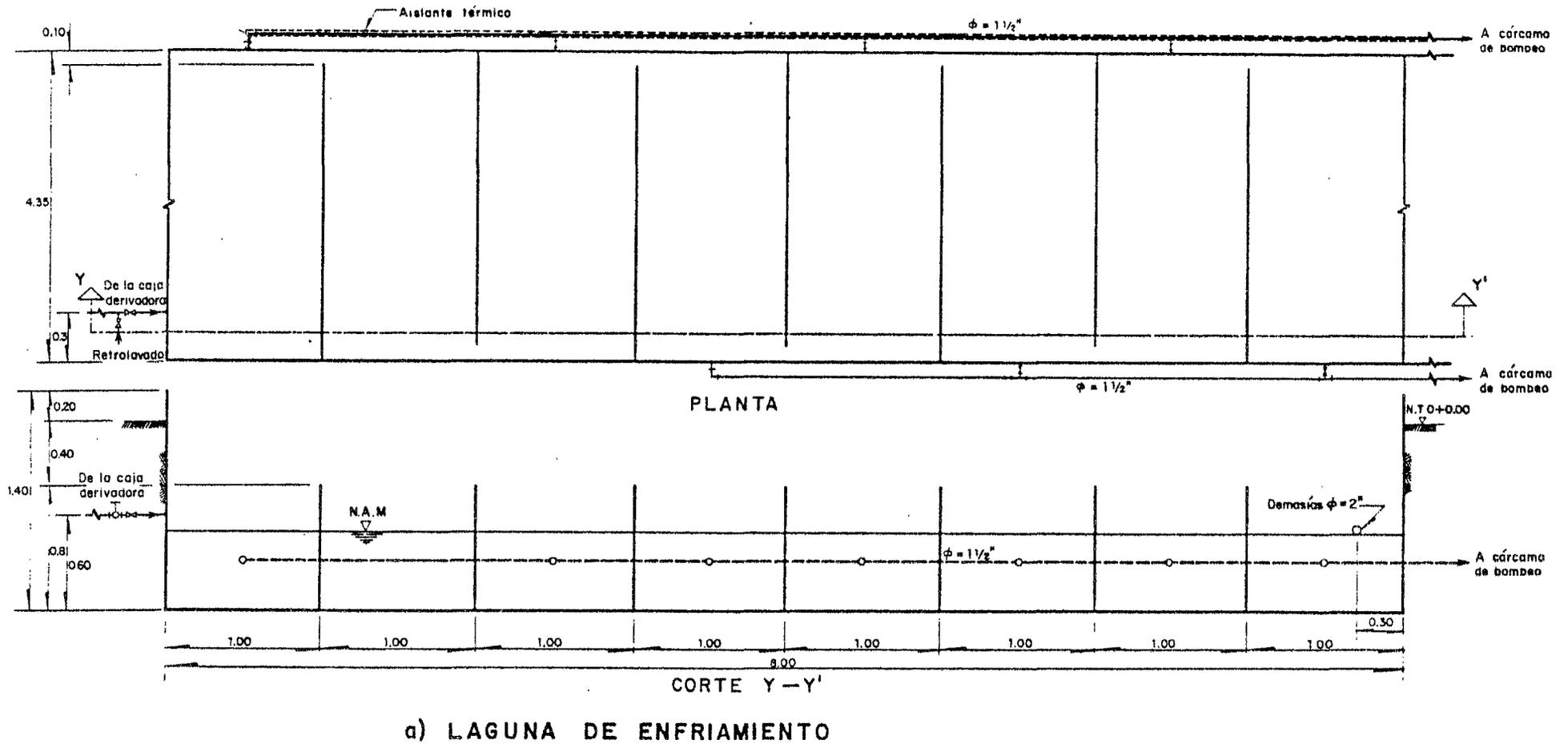


Fig B.5 Componentes principales de las unidades de proceso: a) laguna de enfriamiento, b) caja derivadora, c) cárcamo de bombeo

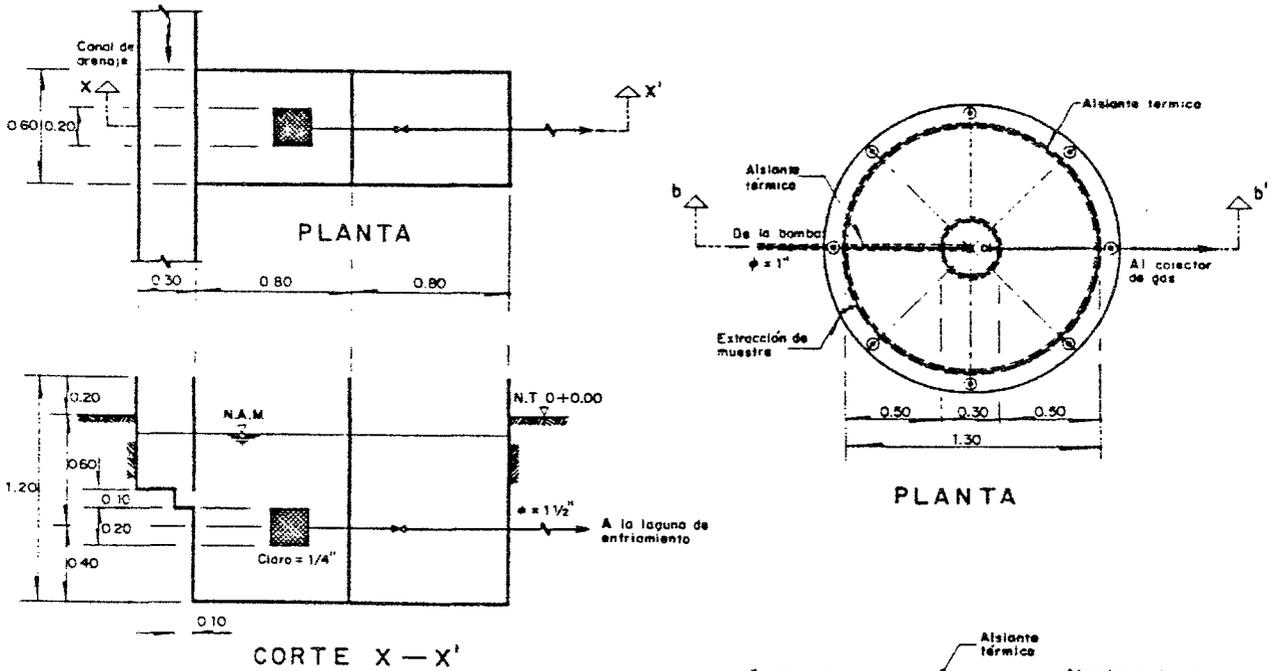


Fig B.5b. Caja derivadora

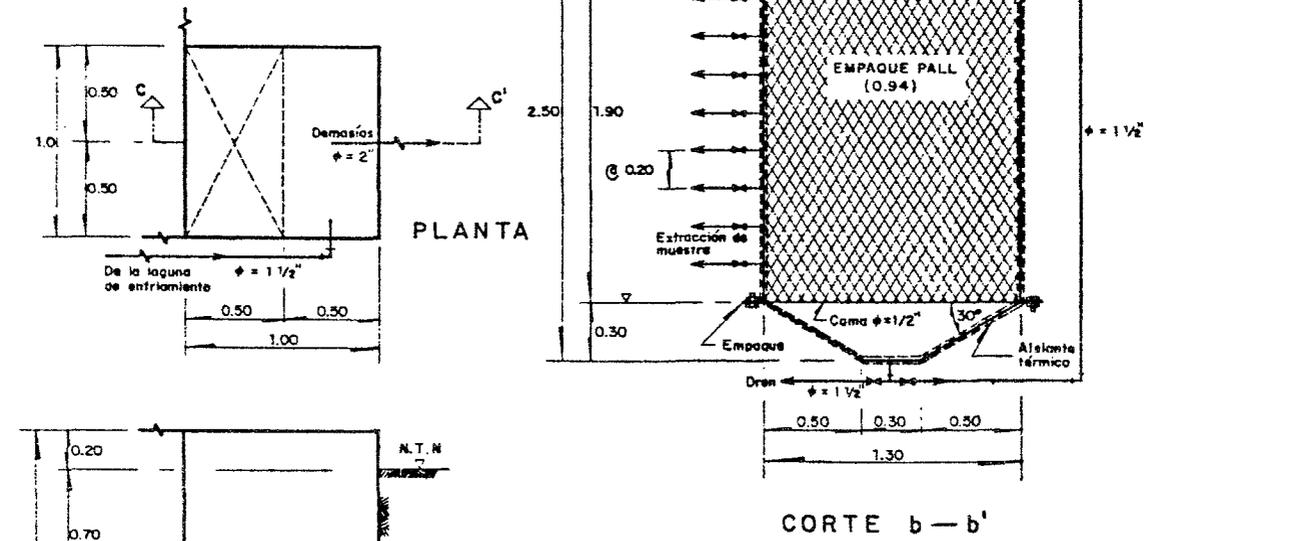
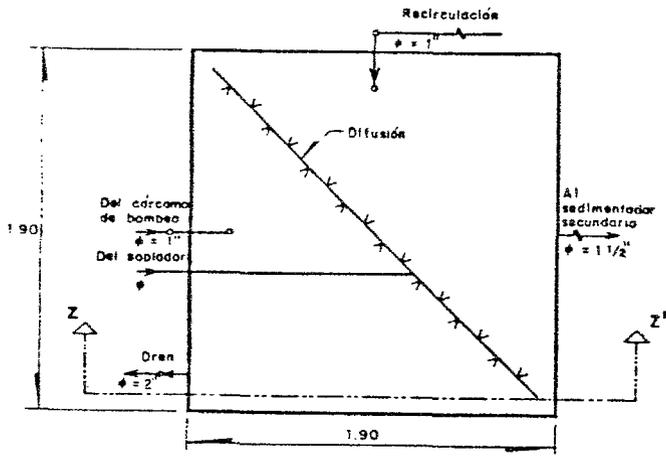
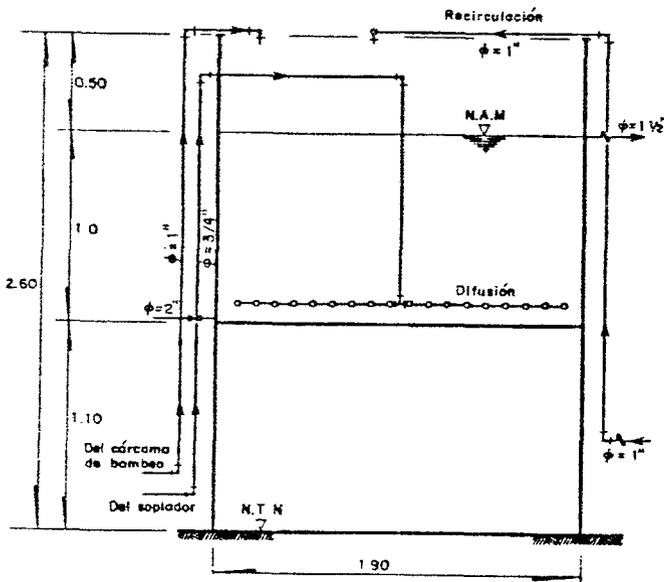


Fig B.6 Reactor anaerobio empacado

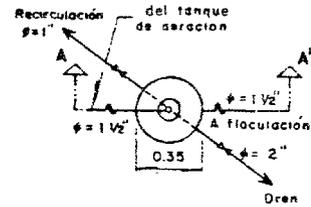
Fig B.5c. Cárcamo de bombeo



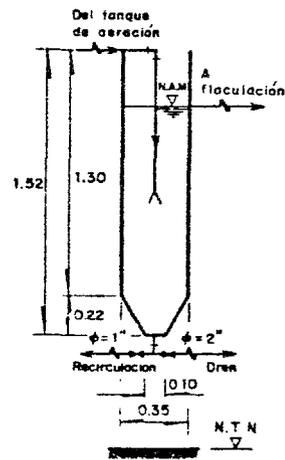
PLANTA



CORTE Z — Z'



PLANTA



CORTE A — A'

Fig B.7 Tanque de aeración

Fig B.8 Sedimentador secundario