

2011 Producción de Hidrógeno a partir de la Fracción
Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) M. Rangel L.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ciencias Naturales

Producción de Hidrógeno a partir de la Fracción Orgánica
de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU)

Tesis
Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Licenciado en Biología

Presenta
Mónica Rangel Landín

Querétaro, Qro.
Mayo 2011



Portada Interna de Tesis

Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ciencias Naturales
Licenciado en Biología

Producción de Hidrógeno a partir de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU)

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Licenciado en Biología

Presenta:

Mónica Rangel Landín

Dirigido por:

Dr. Iván Moreno Andrade

SINODALES

Nombre del Sinodal
Presidente

Firma

Nombre del Sinodal
Secretario

Firma

Nombre del Sinodal
Vocal

Firma

Nombre del Sinodal
Suplente

Firma

Nombre del Sinodal
Suplente

Firma

Nombre y Firma
Director de la Facultad

Nombre y Firma
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Mayo 2011
México

Resumen

El hidrógeno es una fuente alternativa de energía que no produce gases de efecto invernadero ya que durante su combustión solo se produce agua como subproducto. En esta tesis se llevó a cabo un estudio sobre el efecto de la solución tampón y el tamaño de partícula sobre la producción de hidrógeno a partir de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU). La FORSU evaluada se obtuvo de un restaurant del Campus UNAM-Juriquilla. Como inóculo se empleó lodos granulares anaerobios pretratados térmicamente a 105°C por 24 h para inhibir las bacterias metanogénicas. La fase experimental se dividió en dos partes la primera consistía en seleccionar una solución tampón que mantuviera el pH en 5.5 durante la producción de hidrógeno. La segunda parte consistió en determinar el efecto del tamaño de partícula en distintas concentraciones de sólidos totales iniciales de la FORSU. Los Resultados demostraron que la solución tampón de citratos 1M presentó los mejores resultados para mantener el pH de las pruebas cercano a 5.5. En cuanto al tamaño de partícula, la fracción FORSU 1 produjo la mayor cantidad de hidrógeno en comparación con los otros tamaños de partículas. La producción máxima de hidrógeno depende de la concentración inicial de ST, siendo la mejor 100 y 50 y 15 g/L para FORSU 1, 2 y 3 respectivamente. La fracción orgánica de residuos sólidos urbanos tiene un gran potencial para la generación de hidrógeno, produciendo también una alta generación de ácidos grasos volátiles.

Palabras claves: FORSU, fermentación, producción biológica de hidrógeno.

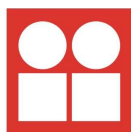
Abstract

Hydrogen is an alternative source of energy that no produces greenhouse gases during its combustion because only water is produced as a byproduct. This thesis conducted a study about the effect of buffer solution and particle size on the biohydrogen production from the Organic Fraction Municipal Solid Waste (OFMSW). The OFMSW evaluated was obtained from a restaurant of the Campus Juriquilla-UNAM. Granular sludge was used as inoculum for hydrogen production. The inoculum was thermal-pretreated at 105°C by 24h to inhibit methanogenic bacteria. The experimental phase was divided into two parts: the first part was to select a buffer to maintain the pH at 5.5 during the hydrogen production. The second part was to determine the effect of particle size at different initial total solids concentrations of OFMSW. Results showed that citrate 1M buffer have the best results to maintain the bottle tests at pH around to 5.5. For the particle size, OFMSW 1 produced the greatest amount of hydrogen in comparison with other particle sizes. The maximum production of hydrogen depends on the initial concentration of total solids, with the best results at 100 and 50 and 15 g/L for OFMSW 1, 2 and 3, respectively. The organic fraction of urban solid waste has the potential to generate hydrogen producing also high values of volatile fatty acid generation.

Keywords: OFUSW, fermentation, biological hydrogen production.

Apoyos Recibidos

Este trabajo fue desarrollado en el Laboratorio de Investigación en Procesos Avanzados de Tratamiento de Aguas (LIPATA), de la Unidad Académica Juriquilla del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).



**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**

LIPATA

LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN
EN PROCESOS AVANZADOS DE
TRATAMIENTO DE AGUAS

Se agradece el apoyo financiero de la Iniciativa de Apoyo Complementario a la realización de las Obras Determinadas (IACOD) a través del proyecto I1102711 y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) a través del proyecto 103720.

Dedicatorias

A Dios que me ha dado vida y salud para llegar hasta este momento, gracias por darme esa capacidad de cumplir una meta más en mi vida, gracias porque de ti nos vienen la verdad y el saber.

Este trabajo se lo dedico a mis padres: **Gloria y Antonio**, gracias a ustedes por el apoyo brindado a lo largo de mi carrera, por su incondicional apoyo en todos los aspectos, sin el cual nunca hubiera podido llegar hasta este momento culminante de mis estudios, gracias por los muchos y sabios consejos que me han brindado a lo largo de mi vida y me han ayudado a formarme como la persona que ahora soy y estoy en este camino de aprendizaje para ser mejor hija, hermana, madre y compañía de esa persona tan especial con quien he compartido momentos tan importantes, gracias **Rodrigo** por tu compañía por tu amor, por todas esas lecciones que he aprendido y me han ayudado a madurar y ver que las tormentas que pasan en nuestra vida podrán ser oscuras y ruidosas, sin embargo hacen con nosotros lo mismo que esa lluvia en la tierra y es prepararla para mostrar esa belleza latente que duerme en su seno, y pasada la tormenta reverdece para dar todo de sí.

A mis hermanos **Itzel y Gabriel** que a pesar de la distancia me han apoyado y han estado conmigo siempre, mil gracias y sigamos adelante!!!!!!!

A mis amigos, compañeros de carrera **Mirna** que nos abandonaste en el camino, **Elisa, Marco, primo, Avi, Lisbeth, Chuy, Evelyn, Felipe** a todos con quienes compartí momentos muy agradables en la carrera, compañeros de la vida

Jaqueline gracias por estar ahí, **Gisela, Mariana, Laura, Lucy** y todas esas personas que me han apoyado incondicionalmente y a pesar de todo, gracias a ti.

Especialmente dedico este trabajo a quién sin saberlo es ahora el motor más grande de mi vida, proyectos y todo lo que tenga que venir: **Olin**, Te amo, gracias por iluminar mi vida.

Agradecimientos

Agradezco al Laboratorio de Investigación en Procesos Avanzados de Tratamiento de Aguas (LIPATA), de la Unidad Académica Juriquilla del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por permitirme realizar en ella este trabajo de tesis.

A los miembros de mi jurado: Dr. Iván Moreno Andrade, Dr. Juan Campos Guillén, M. en C. Joel Quezada Mejorada, M. en C. Kruskaia Karenia Caltzontzin Fernández, por su tiempo y dedicación para revisar y hacer las correcciones pertinentes para este trabajo.

Agradezco el apoyo técnico del M en B. Jaime Pérez Trevilla en el entrenamiento de la operación de equipos especializados, incluyendo su apoyo en la cromatografía de gases, asesoramiento técnico de laboratorio y apoyo en el trabajo rutinario del laboratorio.

Agradezco también el apoyo y paciencia de mi director de tesis Dr. Iván Moreno Andrade, para poder llevar a cabo y concluir este trabajo.

Agradezco el apoyo de Julio César Figueroa Sánchez, por trabajar conmigo en la realización de los experimentos.

Nomenclatura

DQO	Demanda Química de Oxígeno
L	Litros
mg	Miligramos
pH	Potencial de hidrógeno
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SSV	Sólidos Suspendidos Volátiles
°C	Grados centígrados
H ₂	Hidrógeno
AGV's	Ácidos Grasos Volátiles
FORSU	Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos
m ³ _{H2} /kgSV _{añadido}	Metros cúbicos de hidrógeno/ kilogramo de sólidos volátiles añadidos
pH	Potencial de hidrógeno
mm	Milímetros
M	Molar
HCl	Ácido clorhídrico
NaOH	Hidróxido de Sodio
mL	Mililitro
NH ₄ HCO ₃	Bicarbonato de amonio
KH ₂ PO ₄	Fosfato monopotásico
MgSO ₄ -7H ₂ O	Sulfato de Magnesio heptahidratado
NaCl	Cloruro de Sodio
Na ₂ MoO ₄ -2H ₂ O	Molibdato de sodio dihidratado
CaCl ₂ -2H ₂ O	Cloruro de calcio dihidratado
MnSO ₄ -7H ₂ O	Sulfato de manganeso heptahidratado
FeCl ₂	Cloruro de Hierro
g/L	Gramos por litro

ST	Sólidos Totales
rpm	Revoluciones por minuto
CAC	Centro Académico y Cultural
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
psi	<i>Pounds per square inch</i> (libra por pulgada cuadrada)
N ₂	Nitrógeno
h	Horas

Índice

	Página
Resumen	
Abstract	
Apoyos Recibidos	
Dedicatorias	
Agradecimientos	
Nomenclatura	
Índice	
Índice de tablas	
Índice de figuras	
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	
2.1 Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos	4
2.2 Producción biológica de hidrógeno	4
3. OBJETIVOS	12
3.1 Objetivo General	12
3.2 Objetivos particulares	12
4. METODOLOGÍA	13
4.1 Estrategia experimental	13
4.1.1 Inóculo	13
4.1.2 Fuente de Inóculo	14
4.2 Etapa 1. Selección del Buffer	14
4.3 Etapa 2. Evaluación de la producción de H ₂	15

4.4	Técnicas analíticas	16
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
5.1	Determinación de la cantidad de muestra para cada prueba con distintos ST iniciales	19
5.2	Etapa 1. Selección de la solución buffer	19
5.3	Etapa 2. Efecto del tamaño de partícula sobre la producción de hidrógeno	21
5.3.1	Producción de hidrógeno con FORSU 1	21
5.3.2	Producción de hidrógeno con FORSU 2	23
5.3.3	Producción de hidrógeno con FORSU 3	24
5.3.4	pH final de las pruebas de la etapa 2	26
5.3.5	Producción de AGV's	27
5.3.6	Producción de hidrógeno a las 40 h	29
6.	CONCLUSIONES	32
7.	REFERENCIAS	34

Índice de tablas

Tabla	Página
Tabla 1. Cantidad de ST FORSU empleada en cada una de las pruebas.	21
Tabla 2. Soluciones buffer usadas y pH final.	21
Tabla 3. Producción de AGV's para cada ST para la FORSU 1.	28
Tabla 4. Producción de AGV's para cada ST para la FORSU 2.	29
Tabla 5. Producción de AGV's para cada ST para la FORSU 3.	29

Índice de figuras

Figura	Página
Figura 1. Esquema de la digestión anaerobia.	7
Figura 2. Arreglo experimental.	16
Figura 3. Foto del transductor de presión	17
Figura 4. Foto del cromatógrafo de gases SRI	18
Figura 5. Foto del cromatógrafo Varian 3300, equipado con un detector de ionización de flama FID	19
Figura 6. Composición del biogás a diferentes concentraciones de ST de la FORSU 1.	22
Figura 7. Cinéticas de producción de hidrógeno a distintas concentraciones de la FORSU 1, operados a 30 °C.	23
Figura 8. Composición del biogás a diferentes concentraciones de ST de la FORSU 2.	24
Figura 9. Cinéticas de producción de hidrógeno a distintas concentraciones de la FORSU 2, operados a 30 °C.	25
Figura 10. Composición del biogás a diferentes concentraciones de ST de la FORSU 3	26
Figura 11. Cinéticas de producción de hidrógeno a distintas concentraciones de la FORSU 3, operados a 30 °C.	27
Figura 12. pH final por ST por cada tipo de FORSU.	28
Figura 13. Producción de hidrógeno a las 40 h.	31

1

Introducción

Actualmente la sociedad mundial pasa por dos principales problemas, uno es ambiental y otro energético. El primero se debe principalmente a la alta producción industrial y alta población mundial, lo que genera gran cantidad de residuos gaseosos (incluyendo los gases de efecto invernadero), líquidos, sólidos y semisólidos. En cuanto a las dificultades energéticas, se deben principalmente a la disminución de las fuentes convencionales de energía (combustibles fósiles), lo cual ha hecho que empleen recursos renovables y que sean amigables con el ambiente.

Los combustibles fósiles contribuyen al calentamiento global (efecto invernadero), debido a la emisión de gases contaminantes durante su combustión (Gómez *et al.*, 2009). Es por ello que se hace necesario el desarrollo, potencialización e instalación de fuentes de energías renovables para solucionar la demanda actual

de energía. Además hay que considerar las leyes, que dependiendo de cada país en particular, son cada vez más estrictas en cuanto a la emisión de contaminantes y la implementación de energías renovables no convencionales a los sistemas energéticos.

Una solución a las problemáticas planteadas es la obtención de hidrógeno a partir de residuos líquidos y sólidos. Este gas tiene la particularidad de ser un combustible limpio, ya que como resultado de su combustión se produce agua y no genera dióxido de carbono (CO_2), siendo una ventaja en comparación a la producción de metano (CH_4), lo cual lo transforma en una energía sin efecto invernadero (Gómez *et al*, 2009).

Actualmente, la producción industrial de hidrógeno es principalmente a partir del petróleo, la nafta y gas natural, gasificación del carbón mineral y mediante electrólisis y fotoelectrólisis del agua. Sin embargo, esto crea una contradicción ambiental ya que el H_2 es generado desde fuentes de energías contaminantes y limitadas.

El hidrógeno puede ser generado a través de diversos procesos, los cuales pueden agruparse en procesos termoelectroquímicos y biológicos. La obtención termoquímica de hidrógeno a partir de residuos líquidos y sólidos es una alternativa que requiere de altas temperaturas (cercano a 1000°C) y en algunos casos la aplicación de químicos (como H_2SO_4) con el fin de disminuir la temperatura de operación. La aplicación de la energía nuclear o la solar pueden ser incluidas para llevar a cabo el proceso termoelectroquímico.

La producción de hidrogeno mediante microorganismos es el resultado del metabolismo de estos, mediante enzimas con actividad de hidrogenasas y nitrogenasas, siendo el H_2 el aceptor final de electrones. El proceso puede ser realizado mediante cultivos puros de microorganismos (aerobios, facultativos y

anaerobios), bacterias fotosintéticas, cianobacterias, algas o consorcios microbianos (Gómez *et al.*, 2009).

En años recientes, se ha estudiado la producción de H₂ por medio de la fermentación biológica de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos, (FORSU). Dicha fracción cuenta con un alto contenido de materia orgánica con un alta biodegradabilidad a un bajo costo.

En estos procesos los microorganismos y enzimas requieren un rango de pH adecuado para llevar a cabo los procesos bioquímicos y no afectar las rutas metabólicas hacia la producción de hidrógeno, cuyo valor óptimo se encuentra alrededor de un pH de 5.5, es por ello, que cuando se evalúa el potencial de generación de H₂ en reactor operados por lote, se requiere que el pH se mantenga constante o no presente una alta fluctuación o caída, ya que se verán afectadas negativamente las reacciones bioquímicas.

Debido a lo anterior, es importante evaluar factores para incrementar la eficiencia de producción de hidrógeno. En la presente tesis se evaluará el efecto del tamaño de partícula de sustratos accesibles como la FORSU en la producción biológica de hidrógeno.

2

Fundamento teórico

2.1 Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos

Los cambios socioeconómicos de las últimas décadas, altas concentraciones de población en núcleos urbanos, desarrollo de la industria agroalimentaria, intensificación de las explotaciones ganaderas, prácticas consumistas, etc., han propiciado la producción de grandes cantidades de residuos orgánicos que ocasionan graves problemas ambientales. La mayor parte de los residuos generados por la actividad humana son los residuos municipales o domésticos. Tanto la producción de este tipo de residuos, como las vías de tratamiento evolucionan muy rápidamente, debido, tanto al cambio en los hábitos de consumo, como al desarrollo de determinadas políticas estratégicas. Existe una

clara tendencia hacia la recogida selectiva de materiales diversos, papel, vidrio, envases, residuos peligrosos, escombros y de materia orgánica. De esta forma la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos resulta cada vez de “mayor calidad” y más fácil de estabilizar por métodos biológicos (Campos, 2001).

Los residuos sólidos urbanos (RSU) están conformados por residuos domésticos, comerciales, institucionales, de barrido de calles, de poda, de mercados y hospitalarios que no sean peligrosos ni de manejo especial y son definidos en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR, 2007) como: Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por esta Ley como residuos de otra índole (LGPGIR, 2007).

En nuestro país se generan 94,800 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos equivalentes a 36.6 millones de toneladas anuales, de los que en 2004 el 53% de los RSU eran de origen orgánico, 28% potencialmente reciclables como papel y cartón (14%), vidrio (6%), plásticos (4%), hojalata (3%) y textiles (1%), mientras que el 19% restante se componía de madera, cuero, hule, trapo y fibras diversas (Meraz, 2010).

Actualmente, se registra un volumen creciente en la generación de desechos orgánicos a nivel mundial. Por ejemplo, en la Ciudad de México una familia promedio de cinco integrantes, produce mensualmente un metro cúbico de basura, lo que significa tres millones de metros cúbicos mensuales de la cantidad de basura total en la Ciudad de México (García-Jarquín, 2009).

En la ciudad de Querétaro, el relleno sanitario comenzó a recibir residuos en septiembre de 1996. Teniendo una capacidad total de aproximadamente 6.1 millones de toneladas, actualmente el relleno acepta cerca de 300, 000 toneladas diariamente de las cuales cerca del 34.2% corresponden a comida y poda, 17.5% papel y cartón, 23 % plásticos, 4.3% goma, cuero y textiles, 2.6% metales, 1% madera, 4.3% vidrio, 1.5% residuos de construcción, otros orgánicos 5.2% y otros inorgánicos 6.4% (SCS Engineers, 2005).

2.2 Digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia se lleva a cabo en ausencia de oxígeno. Un gran número de microorganismos que trabajan en serie o en paralelo, degradan la materia orgánica en sucesivas etapas (figura 1) para producir biogás el cual es una mezcla de metano, CO₂ y trazas de otros gases como el hidrógeno. Este proceso puede dividirse en cuatro fases o procesos (Ruiz *et al.*, 2000):

- a) Hidrólisis: Es la primera etapa en la que las enzimas extracelulares degradan la materia orgánica y la transforman en productos sencillos de bajo peso molecular.
- b) Etapa fermentativa o acidogénica (fase ácida): Las bacterias acidificantes transforman la materia orgánica disuelta (aminoácidos, azúcares, ácidos grasos de cadena larga), en CO₂ e H₂ y ácidos grasos volátiles. Las bacterias implicadas son facultativas y el proceso es relativamente rápido.
- c) Etapa acetogénica: Las moléculas orgánicas de pequeño tamaño, sobre todo los ácidos grasos volátiles, son transformados en acetato, por bacterias facultativas que viven en estrecha colaboración con las bacterias metanogénicas
- d) Etapa metanogénica: Es la única estrictamente anaerobia y en ella las bacterias metanogénicas producen CH₄ a partir de mezclas CO₂ + H₂ o de ácido acético. La velocidad de esta fase es baja (Villaseñor, 2001).

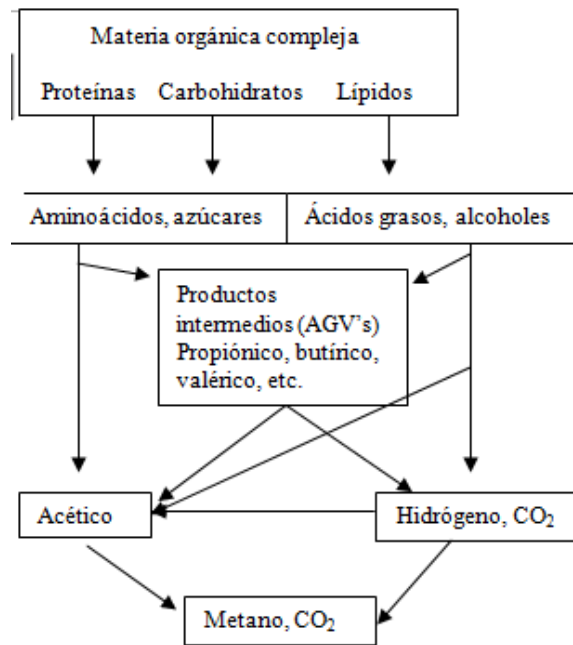


Figura 1. Esquema de la digestión anaerobia.

A continuación se describen los grupos de bacterias que llevan a cabo la producción del biogás: las bacterias hidrolíticas producen las enzimas que se encargan de degradar los polímeros (carbonatos, proteínas y lípidos) convirtiéndolos a compuestos de bajo peso molecular como azúcares, aminoácidos, alcoholes, ácidos carboxílicos y compuestos aromáticos.

Las bacterias fermentadoras transforman los azúcares y aminoácidos en ácidos grasos volátiles (acetatos, propionatos, butiratos, valeratos), dióxido de carbono, hidrógeno y células, mientras que los lípidos y los ácidos grasos de cadena larga son convertidos en ácidos grasos volátiles, a través del mecanismo de β -oxidación (Saval, 1996).

Las bacterias fermentadoras e hidrolíticas tienen un funcionamiento ligado a la concentración de hidrogeno en el medio, si se encuentra en valores de 5-50 ppm, existe una preferencia hacia la producción de acetato, si rebasa ciertos valores, la producción de acetato baja y existe un aumento en la producción de otros ácidos grasos volátiles (AGV). Los géneros de bacterias fermentadoras pertenecientes a

este grupo son: *Pseudomonas*, *Lactobacillus*, *Zymomonas*, *Escherichia*, *Sarcina*, *Selenomonas*; y los géneros de bacterias hidrolíticas son: *Clostridium*, *Acetovibrio*, *Micrococcus*, *Staphylococcus* y *Bacillus*.

En el caso de las bacterias acetogénicas, este grupo transforma los ácidos grasos de cadena corta en acetato, dióxido de carbono, e hidrógeno, por un grupo denominado bacterias acetogénicas productoras obligadas de hidrógeno (OPHA). Las OPHA se ven inhibidas por el hidrógeno que ellas mismas producen así que forman una relación sintrófica con las bacterias metanogénicas hidrogenófilas las cuales consumen el H₂ producido de tal forma que la actividad de las bacterias acetogénicas no sea inhibida, esta relación recibe el nombre de transferencia interespecie de oxígeno. El hidrogeno es un intermediario importante en los organismos acetogénicos, este se produce durante la fermentación de carbohidratos y otros sustratos, y en la subsiguiente degradación del ácido propiónico y otros AGVs de alto peso molecular. Los géneros de bacterias pertenecientes a este grupo son: *Syntrophomonas* y *Syntrophobacter*.

Por último, las bacterias metanogénicas acetoclásticas tienen como función el convertir el ácido acético en biogás compuesto por metano y en menor proporción por dióxido de carbono (fundamentalmente tres géneros de estas bacterias: *Methanosarcina*, *Methanospirillum* y *Methanotrix*) y las bacterias metanogénicas hidrogenófilas que coexisten con las bacterias acetogénicas pues catalizan la reacción entre el hidrógeno producido por estas últimas y el dióxido de carbono para producir metano (géneros pertenecientes a este subgrupo son: *Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanosarcina*, *Methanospirillum*, *Methanobrevibacterium* y *Methanoplanus*).

En el proceso anaerobio, sólo una pequeña cantidad de la energía contenida en el sustrato es utilizada en el mantenimiento y crecimiento celular (10%), quedando una gran parte en los productos, en forma de biogás.

2.3 Producción biológica de hidrógeno

Recientemente se ha observado que existe la posibilidad de emplear los procesos anaerobios para la producción de hidrógeno, sin llegar a la transformación del sustrato a metano, lo cual se logra manteniendo solamente la fase acidogénica que es donde el hidrógeno es producido inhibiendo las bacterias consumidoras de hidrógeno. Además de la producción de H_2 , los principales productos generados en un proceso hidrolítico-acidogénico, en general, son ácidos orgánicos (AGV y ácido láctico) y solventes (acetona y etanol).

Mediante un proceso hidrolítico-acidogénico, la producción máxima teórica de hidrógeno, bajo condiciones anaerobias, es de $4 \text{ mol}_{H_2}/\text{mol}_{\text{glucosa}}$, junto con la producción de acetato y dióxido de carbono, a partir de. Sin embargo, cuando hay producción de ácido butírico o etanol, el rendimiento molar se reduce a $2 \text{ mol}_{H_2}/\text{mol}_{\text{glucosa}}$. Si el proceso se lleva a cabo de forma facultativa, la producción es de $2 \text{ mol}_{H_2}/\text{mol}_{\text{glucosa}}$ (Nandi y Sengupta, 1998; Nath y Das, 2004), pese a la disminución del rendimiento, este proceso tiene la ventaja de no ser sensible a la presencia de oxígeno, por lo que se puede recuperar el proceso debido al ingreso accidental de oxígeno.

Uno de los residuos más estudiados para la producción de hidrógeno es la FORSU ya que es biodegradable y puede usarse como sustrato asequible para transformarla en hidrógeno. Al utilizar FORSU como sustrato para producir hidrógeno, la composición de este es de gran importancia, ya que puede haber una serie de sustancias inhibitorias para el crecimiento celular y/o para las enzimas extracelulares, que son los encargados de la metabolizar las diferentes componentes para la producción de hidrógeno. Además, si el residuo es altamente biodegradable, se generará un efluente líquido muy rico en AGV, los que pueden acidificar el reactor y afectar negativamente el proceso.

Para la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, su potencial de producción de hidrógeno variará de acuerdo a sus distintos componentes

(carbohidratos, lípido, proteínas). Dependiendo de cuan recalcitrante sea la fracción de carbohidratos (lignocelulósico o azúcares simples de fácil metabolización) (Dong *et al.*, 2009) o de las otras fracciones que sean potencialmente transformables a H₂ (proteínas y lípidos) (Lay *et al.*, 2003). Los carbohidratos de fácil degradación (como glucosa, sacarosa y almidón) son los principales sustratos para la producción de H₂ (Noike y Mizuno, 2000), ya que el aceite/grasa poseen un escaso rendimiento de producción de hidrógeno (0.00-0.01 m³_{H2}/kgSV_{añadido}) (Dong *et al.*, 2009). Un mayor contenido de proteínas sería beneficioso para la producción de H₂ (Kim *et al.*, 2004), pero también se ha observado lo contrario (Noike y Mizuno, 2000); lo cual dependería del tipo y origen de las proteínas que compone el residuo. También puede haber inhibición por una alta concentración alcohol (Dong *et al.*, 2009) y de nitrógeno amoniacal (Wang *et al.*, 2009).

Además de la composición, los principales factores que afectan la producción de hidrógeno son la temperatura, pH y concentración de sólidos. La temperatura tiene un efecto sobre las cinéticas de crecimiento y productividad del o los microorganismos y de la actividad enzimática. Es por ello que puede actuar sobre las rutas metabólicas, pudiéndose direccionar estas hacia la producción de hidrógeno o de otros productos terminales (etanol, ácido láctico, acetona, AGV). Para el caso de microorganismos hidrolíticos-acidogénicos, la máxima velocidad específica de crecimiento (μ) se encuentra entre 36-38°C y 51-53°C, siendo mayor μ en el rango termofílico (Zoetemeyer *et al.*, 1982).

El pH es uno de los factores ambientales de la operación de reactores y afecta la actividad enzimática y celular, teniendo estos un rango específico de pH, para su óptima o máxima actividad. En el caso de la producción de hidrógeno se ha determinado que un rango entre 5 y 5.5 es el óptimo (Buitrón *et al.*, 2010)

Se ha reportado que la concentración de sólidos totales adecuada al interior de un reactor, con el fin de obtener hidrógeno a partir de residuos sólidos, varía entre

1.3-50 g/L (Fountoulakis y Manios, 2009; Kim et al., 2004; Noike y Mizuno, 2000) o entorno a 25%p/p (Valdez-Vazquez y Poggi-Varaldo, 2009). La concentración de sólidos a aplicar en un reactor depende de la composición y biodegradabilidad del residuo, el tipo y configuración del digestor y el tiempo de adaptación y el tipo de biomasa.

3

Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar el efecto del tamaño de partícula de la de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos sobre la producción biológica de hidrógeno.

3.2 Objetivos particulares

1. Determinar la mejor solución tampón y su concentración adecuada para la producción de hidrogeno a partir de la FORSU.
2. Determinar la influencia de la selección de tres diferentes tamaños de partículas de una FORSU molida sobre la producción de hidrógeno.
3. Determinar la composición del biogás producido por distintas concentraciones de sólidos totales iniciales de FORSU (en los tres diferentes tamaños de partículas).

4

Metodología

4.1. Estrategia experimental

La estrategia experimental contempló dos etapas. La primera fueron pruebas para determinar la mejor solución tampón para realizar las pruebas de producción de hidrógeno a partir de la FORSU y la segunda fase fue la evaluación de la producción de hidrógeno a partir de tres diferentes tamaños de partículas de una FORSU sobre la producción de hidrógeno.

4.1.1 Fuente de FORSU

La FORSU usada como sustrato, provino de la cafetería del Centro Académico Cultural (CAC), ubicado en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) del Campus Juriquilla. Estos residuos fueron recolectados durante tres semanas y preservados a 4 °C, separando el material inorgánico. Después, las muestras fueron homogeneizadas y trituradas en una licuadora eléctrica y separados en tres tamaños de partícula: FORSU 1 (partículas mayores de 2mm), FORSU 2

(partículas menores de 2 mm hasta 0.5 mm) y FORSU 3 (partículas menores de 0.5 mm), posteriormente fueron congeladas a -4°C hasta su uso.

4.1.2 Fuente de Inóculo

El inóculo representa a los microorganismos que degradaran al sustrato y producirán hidrógeno, para el experimento se usaron lodos provenientes de una planta de tratamientos de aguas residuales de una industria cervecera, los recibieron un tratamiento térmico para inhibir a los microorganismos metanogénicos. Los microorganismos Hidrolíticos-acidogénicos, principalmente del género *Clostridium* tienen la capacidad de esporular ante un estrés como un choque térmico. El tratamiento se hizo en una estufa por 24 horas a una temperatura de $103-106^{\circ}\text{C}$.

4.2 Etapa 1. Selección del Buffer

Para mantener el pH de las pruebas de producción de H_2 , se evaluaron cinco distintas soluciones buffer:

- 1.- Solución amortiguadora de citratos 0.1M + 100 ml de agua. Se preparó ácido cítrico y citrato sódico a 0.1M , se mezclaron en 16 y 34 ml respectivamente y se diluyó en 100 ml de agua destilada, el pH fue regulado a 5.5 con HCL y NaOH ambos a 2M .
- 2.- Solución amortiguadora de citratos + 25 mL de agua. Se preparó ácido cítrico y citrato sódico a 0.1M , se mezclaron en 16 y 34 ml respectivamente y se diluyó en 25 mL de agua destilada, el pH fue regulado a 5.5 con HCL y NaOH ambos a 2M .
- 3.- Solución amortiguadora de citratos 0.1M . Se preparó ácido cítrico y citrato sódico a 0.1M , se mezclaron en 16 y 34 ml respectivamente, el pH fue regulado con HCL y NaOH 2M .
- 4.- Solución amortiguadora de fosfatos y carbonatos. Se preparó una solución con los siguientes reactivos: 100 g de NH_4HCO_3 , 50 g de KH_2PO_4 , 5 g de $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.5 g de NaCl , 0.5 g de $\text{Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 0.5 g de

CaCl₂-2H₂O, 0.75 de of MnSO₄-7H₂O, y 0.139 g de FeCl₂ en 500 ml de agua destilada, el pH fue regulado con HCL y NaOH 2M

- 5.- Solución amortiguadora de citratos 1M. Se preparó ácido cítrico y citrato sódico a 1M, se mezclaron en 16 y 34 ml respectivamente destilada, el pH fue regulado a 5.5 con HCL y NaOH 2M.

En todas las pruebas se usaron 30 mL de inóculo, 100 mg/L de FORSU 3 y 10 mL de la solución tampón respectiva, además se mantuvo la temperatura controlada a 30°C y con agitación constante.

4.3 Etapa 2. Evaluación de la producción de H₂

Se emplearon reactores en lote de 120 ml de capacidad, (con 80 mL de volumen líquido y un espacio de cabeza de 40 mL). Los reactores se prepararon con los tres distintos tamaños de partículas con distintas concentraciones iniciales: 5, 10, 15, 20, 30, 50 y 100 g/L de ST de FORSU. A cada reactor se le añadió 30 ml del inóculo previamente seleccionado para producción de hidrógeno y 10 ml de la solución tampón, después son aforados hasta 80 ml. No hubo adición de nutrientes.

La temperatura de los reactores se mantuvo a 30 °C, usando una pecera y un calentador. Los frascos fueron agitados con un agitador magnético orbital a una velocidad de 150 rpm, con el fin de mantener homogenizado la mezcla, todos los reactores se operaron por duplicado (Figura 2).



Figura 2. Arreglo experimental donde se acomodan los reactores de tal forma que todos y cada uno estén sobre un agitador para mantener la mezcla homogénea, cada reactor se encuentra sellado a fin de evitar la fuga del biogás. La temperatura se mide con el termómetro para evitar cambios drásticos.

4.4 Técnicas analíticas

Para la evaluación de la operación de los biorreactores, se emplearon las siguientes técnicas analíticas:

Demanda Química de Oxígeno (DQO): Las muestras fueron filtradas con filtros de microfibras de vidrio (*glass microfibre*) GFA (Whatman). Posteriormente fueron procesadas de acuerdo con las técnicas de HACH, Micrométodo para determinación de DQO (420 COD Low Range y 430 COD Low Range).

Sólidos Suspendidos Volátiles y Sólidos Suspendidos Totales (SSV y SST): Los sólidos suspendidos volátiles y totales (SSV y SST) se determinaron de acuerdo a APHA (1992) por métodos gravimétricos.

Las presiones generadas son el resultado de la acumulación del biogás producido. Para evitar errores, la presión generada durante el procedimiento de tapado de los frascos fue purgada. Las presiones derivadas de la generación de biogás se toman cada hora, durante 60 horas. Después de cada día y cuando las

presiones son superiores a 3 psi los reactores son purgados, tratando de mantener una generación de biogás similar a la atmosférica, con el fin de evitar inhibición por la presión parcial del hidrógeno. Para medir las presiones generadas se usa un transductor de presión (marca lutron) (Figura 3).



Figura 3. Foto del transductor de presión, este aparato puede medir presiones en las diferentes unidades: atm, mmHg, Pa, psi.

Para determinar la composición del biogás (H_2 , CH_4 , CO_2) se usa cromatografía de gases (Cromatógrafo de gases SRI, equipado con un detector de conductividad térmica y una columna de silica gel conectada en serie con un tamiz molecular 5x, usando como gas acarreador N_2 , figura 4).

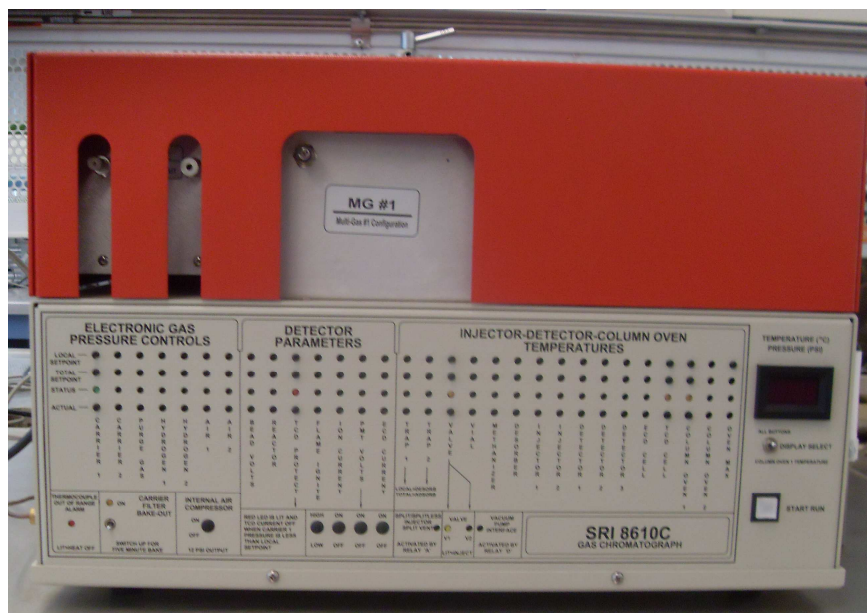


Figura 4. Foto del cromatógrafo de gases SRI

Las muestras para determinar ácidos grasos volátiles (ácido acético, propiónico, isobutírico, butírico e isovalérico) fueron pretratadas. Primero se centrifugaron a 3700 rpm y luego filtradas con filtros de fibra de vidrio (tamaño de poro 2.5 μm) y filtradas nuevamente con filtros de nitrocelulosa (tamaño de poro 0.45 μm), la muestra es diluida y acidificada con HCl 2M para su conservación. Posteriormente son analizadas al cromatógrafo de gases (Varian 3300, equipado con un detector de ionización de flama FID y una columna capilar de sílice Zebarm, figura 5).



Figura 5. Foto del cromatógrafo Varian 3300, equipado con un detector de ionización de flama FID

5

Resultados y discusión

5.1 Determinación de la cantidad de muestra para cada Prueba con distintos ST iniciales

Se calcularon para cada concentración de ST de la FORSU estudiadas, la cantidad de ST a agregar, además de la DQO. El pH inicial para cada frasco fue ajustado a 5.5. En la tabla se muestran los resultados de la determinación de la cantidad de muestra para cada Prueba con destinos ST iniciales.

5.2 Etapa 1. Selección de la solución buffer.

Para la selección de la solución buffer, como se mencionó anteriormente se usaron condiciones iniciales iguales. Los resultados de la capacidad de amortiguamiento durante la producción de hidrógeno demostraron que conforme fue aumentando la concentración de la solución buffer de citratos (compuesta por ácido cítrico y citrato sódico) el pH fue regulado mejor, llegando hasta la

concentración 1M donde el pH alcanzó una muy buena estabilidad, siendo este la mejor opción para realizar las pruebas de producción de hidrógeno (tabla 2).

Tabla 1. Cantidad de ST FORSU empleada en cada una de las pruebas.

ST en g/L	FORSU 1 (gr)	FORSU 2 (gr)	FORSU 3 (gr)
5	1.566	1.501	4.31
10	3.132	3.003	8.62
15	4.698	4.504	12.931
20	6.264	6.006	17.24
30	9.397	9.090	25.862
50	15.662	15.015	43.103
100	31.324	30.030	86.206
DQO inicial	380g/L	350 g/L	280 g/L

En el caso de la solución de fosfatos y carbonatos, se esperaba un mejor funcionamiento, sin embargo, el pH final fue de 3.93 lo cual indica que con este buffer, la producción de hidrógeno podría verse afectada por la acidificación del medio debido a la producción de AGV, lo cual reduce la actividad de los microorganismos productores de hidrógeno (tabla 2). Observando los resultados obtenidos, el buffer de citratos 1M fue empleado para los experimentos de producción de hidrógeno de la etapa 2.

Tabla 2. Soluciones buffer usadas y pH final.

Citratos 0.1 M + 100 ml agua	5.50	3.55
Citratos 0.1 M + 25 ml agua	5.50	4.01
Citratos 0.1 M	5.52	4.26
Fosfatos y carbonatos	5.55	3.93
Citratos 1 M	5.50	5.36

5.3 Etapa 2. Efecto del tamaño de partícula sobre la producción de hidrógeno

Se evaluó la producción de hidrógeno a partir de tres diferentes tamaños de partículas de una FORSU sobre la producción de hidrógeno.

5.3.1 Producción de hidrógeno con FORSU 1

En la figura 6 se muestra el porcentaje de H₂ y CO₂ contenido en el biogás de las pruebas de producción de hidrógeno con un FORSU de un tamaño de partícula mayores de 2mm. Es posible observar que la producción se mantiene alrededor de 40% en todas las ST evaluadas, siendo la FORSU de 20 g/L que tuvo mayor cantidad de hidrógeno en el biogás.

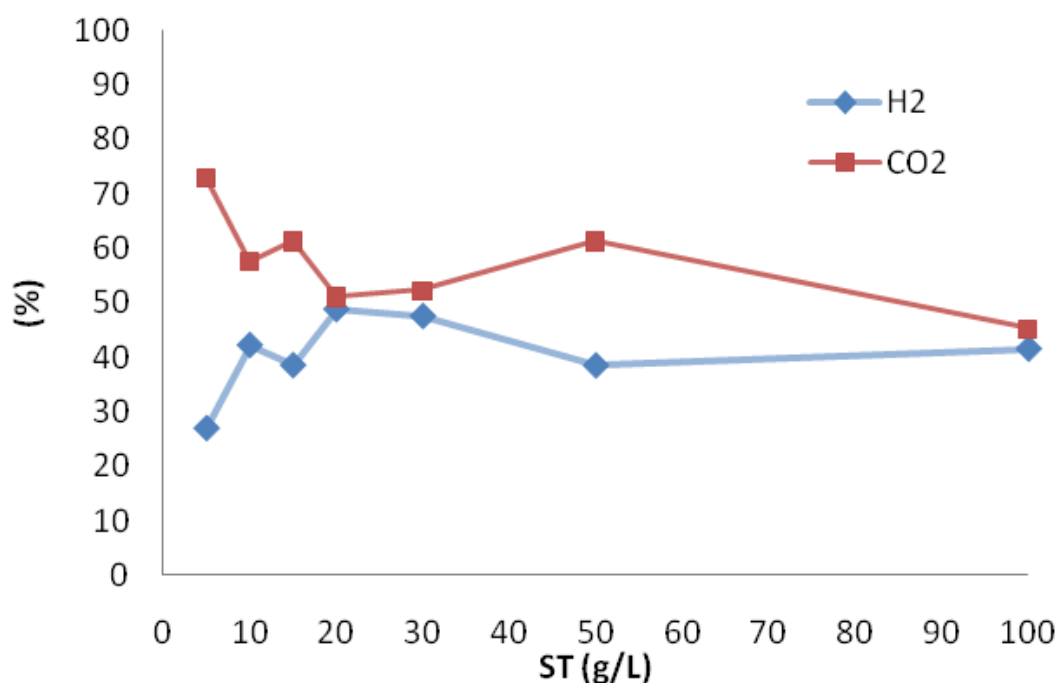


Figura 6. Composición del biogás a diferentes concentraciones de ST de la FORSU 1.

En la figura 7 se muestra la producción de hidrógeno en el tiempo para las distintas concentraciones de ST evaluadas. La máxima producción se obtuvo con 100 g/L de ST siendo muy similar a la obtenida a 50 g/L de ST. Esto indica que en

el caso de la FORSU 1 es preferible emplear 50 g/L de ST que el de 100 g/L para la operación de un reactor piloto por que se usa menos FORSU para la producción de la misma cantidad volumétrica de hidrógeno.

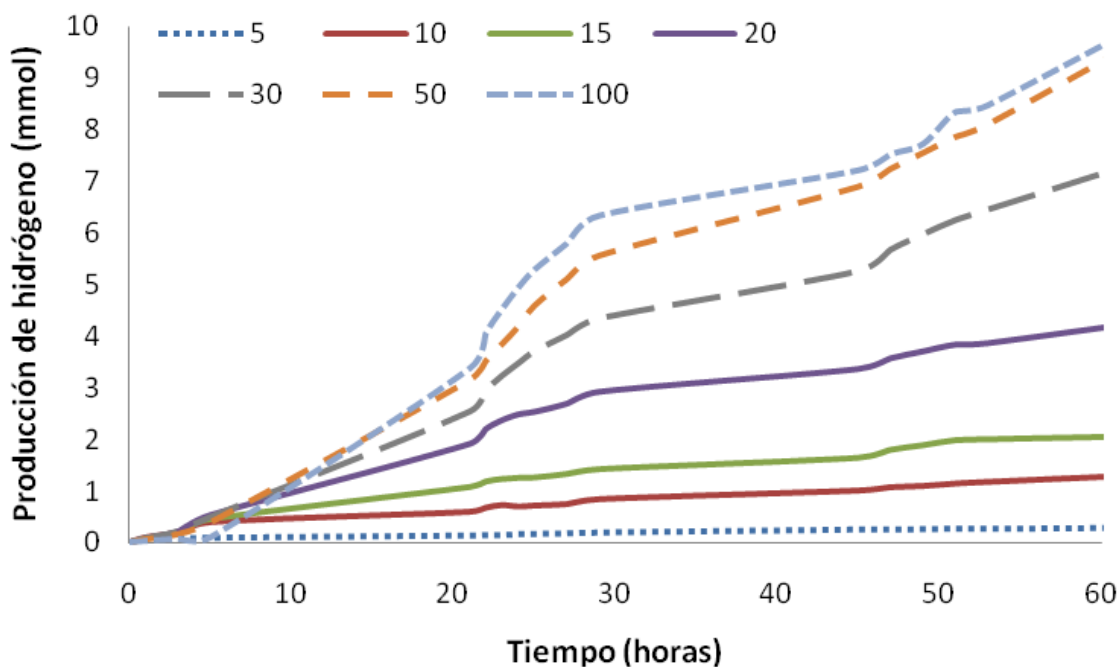


Figura 7. Cinéticas de producción de hidrógeno a distintas concentraciones de la FORSU 1, operados a 30 °C.

Hay que mencionar que en la cinética de producción de hidrógeno en donde hubo menos producción es en la concentración de 5 g/L de ST, la posible causa es que al agregarle una concentración inicial de sustrato, los microorganismos se quedan sin este en un lapso corto de tiempo, al no tener un sustrato para degradar y alimentarse la producción de hidrógeno igualmente es baja.

Es importante señalar que en ninguno de los experimentos montados hubo generación de metano, lo que nos indica que el pretratamiento térmico fue adecuado y se cumplió con el objetivo de inhibir a dichos microorganismos.

5.3.2 Producción de hidrógeno con FORSU 2

En la figura 8, se muestra el porcentaje de H₂ y CO₂ contenido en el biogás de las pruebas de producción de hidrógeno con un FORSU de un tamaño de partícula entre 0.5 y 2mm (figura 7). En este caso, la producción de hidrógeno es constante en las concentraciones de ST de 5 a 50 g/L. Pero en el caso de 100 g/L, el porcentaje de producción de H₂ se reduce, mientras que el CO₂ se incrementa a más del 90%. El mayor porcentaje de hidrógeno para la FORSU 2 se dio con la concentración de 15 g/L de ST, alcanzando el 38% del biogás generado. Para este tamaño de partícula, es recomendable trabajar con concentraciones menores de 50 g/L de ST iniciales ya que, como se observa, no varían mucho en la generación de hidrógeno teniendo porcentajes arriba del 30%.

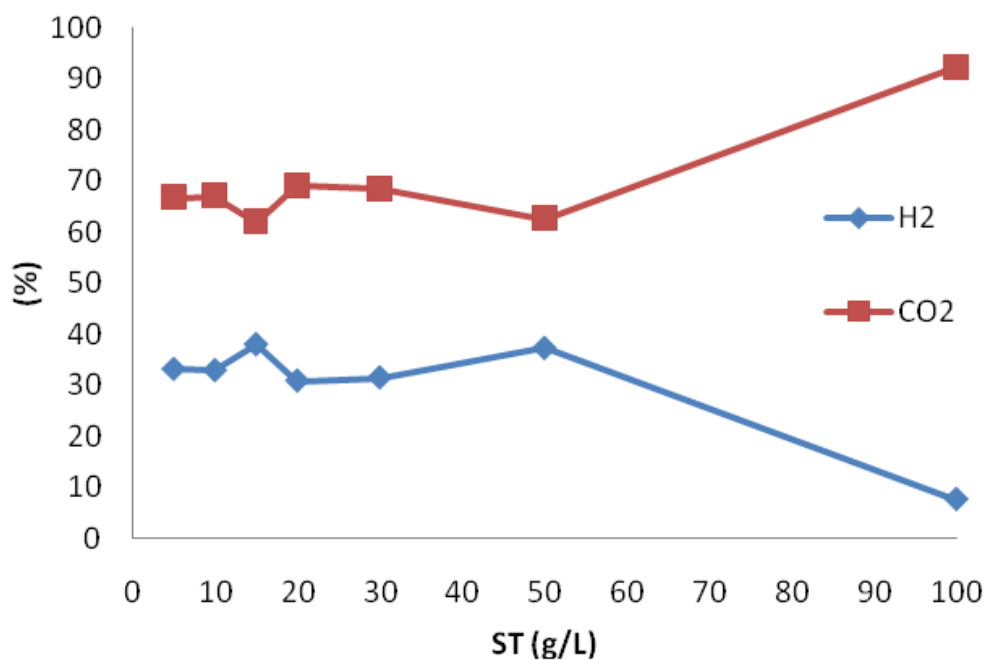


Figura 8. Composición del biogás a diferentes concentraciones de ST de la FORSU 2.

En cuanto la producción de hidrógeno en el tiempo para las distintas concentraciones iniciales de ST, se observa en la figura 9 que, la mayor

producción se da con la concentración de 50 g/L de ST. Se observa que existe un límite en donde una alta concentración de ST iniciales puede producir inhibición, principalmente debido a dos causas: una alta concentración de sólidos que puede interferir en la transferencia de masa entre los microorganismos y el sustrato y la otra causa es la generación de AGV's, ya las altas concentraciones de éstos, provocan una saturación de los mismos, reducción del pH y acidificación del medio dentro del reactor disminuyendo la generación de hidrógeno, este fenómeno se observa claramente en la FORSU con la concentración de 100 g/L ST.

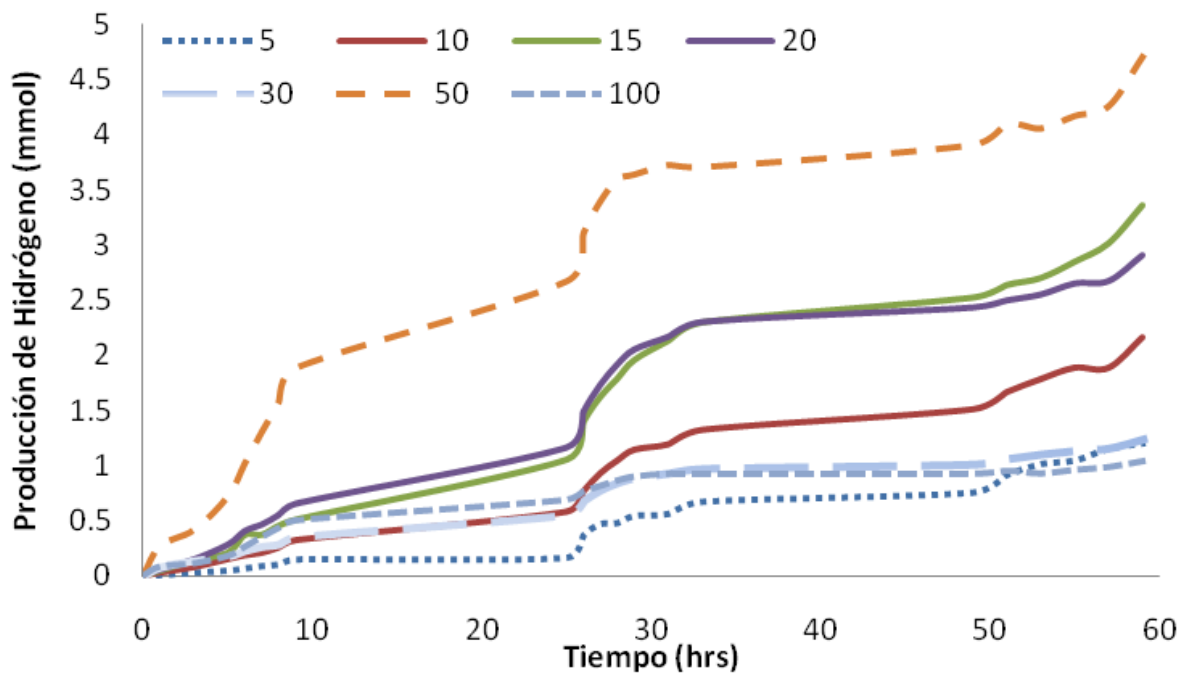


Figura 9. Cinéticas de producción de hidrógeno a distintas concentraciones de la FORSU 2, operados a 30 °C.

5.3.3 Producción de hidrógeno con FORSU 3

En la figura 10, se muestra el porcentaje de H₂ y CO₂ contenido en el biogás de las pruebas de producción de hidrógeno con un FORSU de un tamaño de partícula menores a 0.5mm (figura 10). La figura 6 representa los distintos porcentajes de hidrógeno contenido en el biogás generado para distintas

concentraciones iniciales de ST. Se puede observar que la mayor producción de hidrógeno se obtuvo a 5 g/L de ST. A concentraciones mayores de ST iniciales, la composición del biogás se mantiene entre 20 y 40%, disminuyendo en las últimas dos concentraciones (50 y 100), donde existe un mayor concentración de ST.

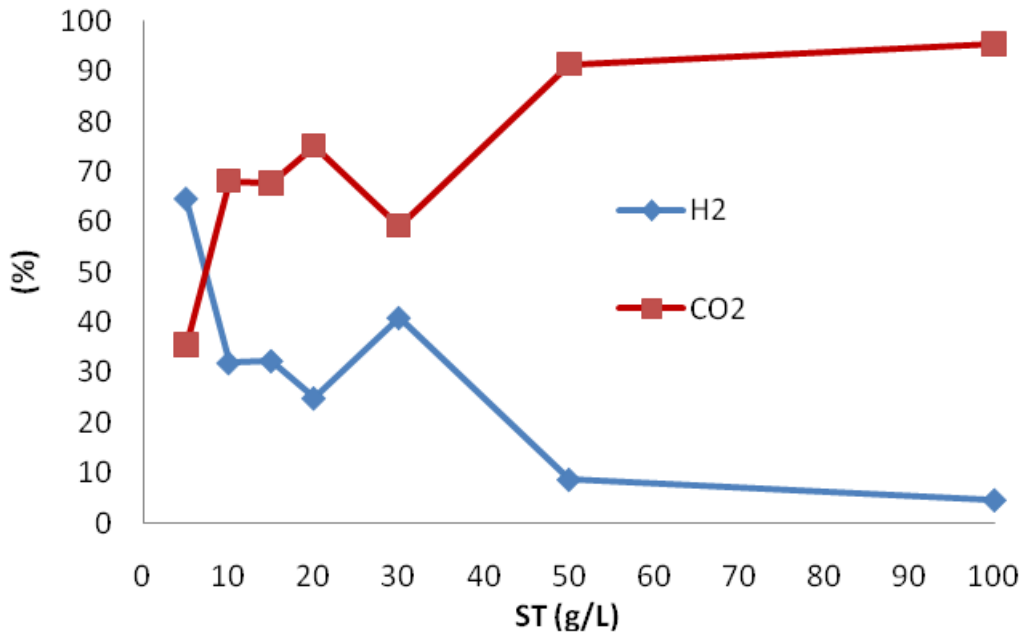


Figura 10. Composición del biogás a diferentes concentraciones de ST de la FORSU 3.

Las cinéticas de producción de biogás mostradas en la figura 11 muestran que la mayor producción de biogás se da en la concentración de 15 g/L de ST, seguido por el de 20 g/L de ST. En esta ocasión la menor producción se da en la concentración de 100 g/L y 50 g/L de ST, para este tipo de FORSU, se aconseja trabajar en concentraciones entre 10 y 30 g/L.

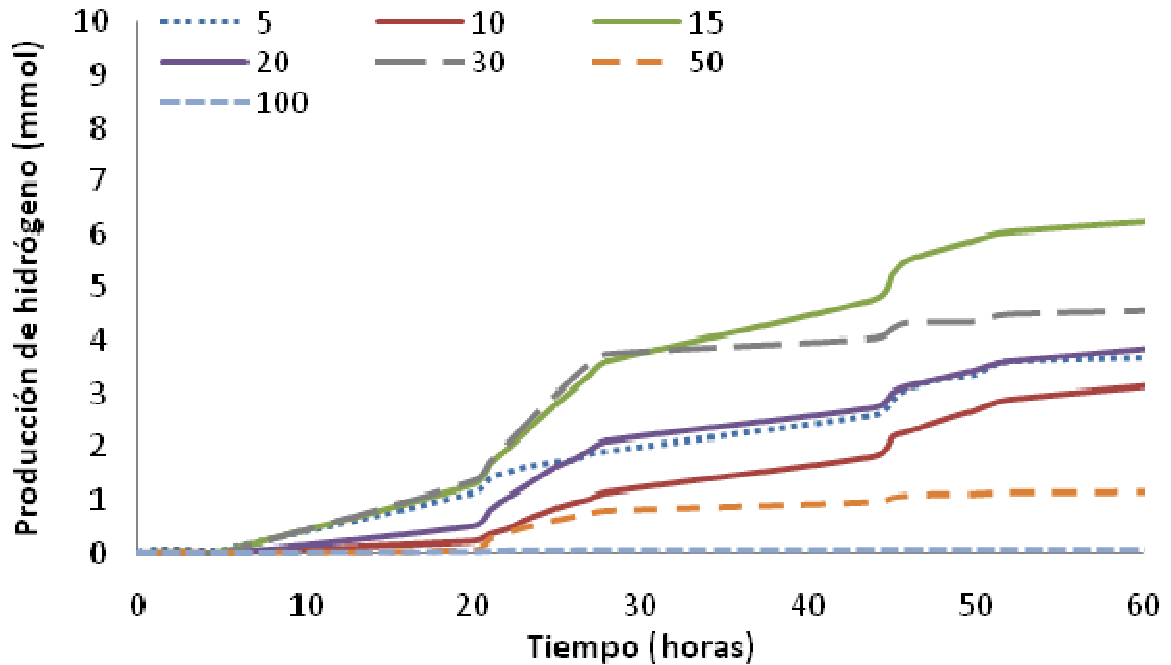


Figura 11. Cinéticas de producción de hidrógeno a distintas concentraciones de la FORSU 3, operados a 30 °C.

5.3.4 pH final de las pruebas de la etapa 2

La figura 12 presenta los valores finales de pH después de la producción de hidrógeno para los tres tamaños de partículas con diferentes ST iniciales. Es posible observar que a pesar de la producción de AGV's la solución buffer de citratos 1M funcionó de manera adecuada, siendo la FORSU 1 la que menos varió.

Observando los Sólidos Totales, el pH se mantuvo con muy buena estabilidad en concentraciones de 5 g/L a 30 g/L, después comienza con variaciones más amplias cuando aumenta las concentraciones, teniendo una disminución significativa cuando llega a 100 g/L de ST, relacionado con la producción de AGV.

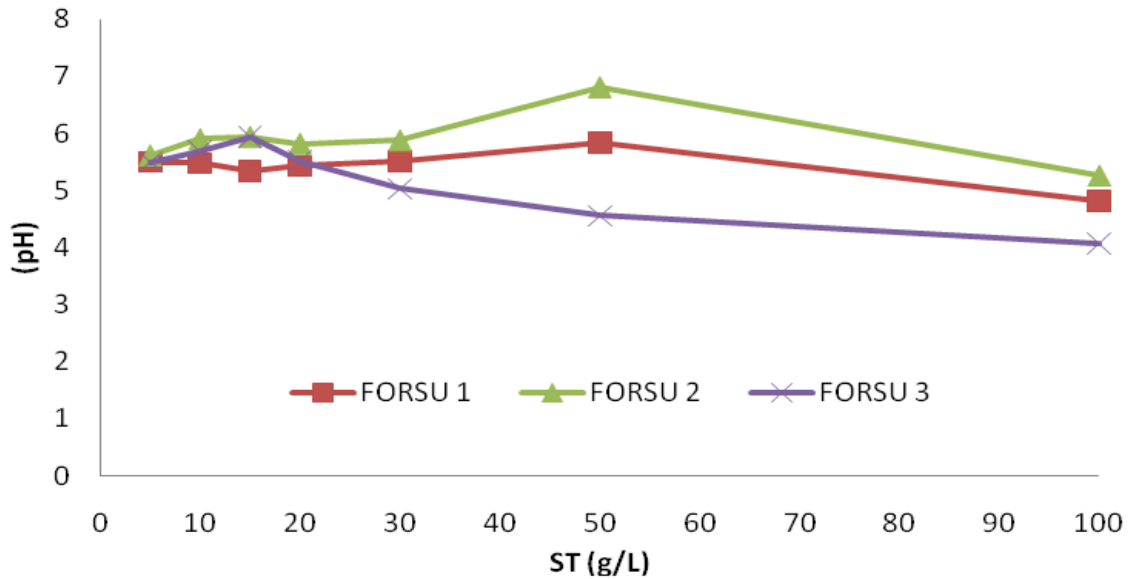


Figura 12. pH final por ST por cada tipo de FORSU.

5.3.5 Producción de AGV's

Al final de cada experimento se cuantificó la producción de AGV's. Las tablas 3, 4 y 5 presentan los valores de la producción de AGV's de los distintos ST iniciales, para la FORSU 1, FORSU 2 y FORSU 3, respectivamente.

Tabla 3. Producción de AGV's para cada ST de la FORSU 1.

ST	Acético	Propiónico	Isobutírico	Butírico
5	374	54	35	40
10	325	24	26	39
15	386	17	24	53
20	469	21	23	75
30	584	18	21	246
50	1219	22	20	426
100	1562	10	24	223

Tabla 4. Producción de AGV's para cada ST para la FORSU 2.

ST	Acético	Propiónico	Isobutírico	Butírico	Isovalérico
5	ND	ND	10	ND	ND
10	3911	666	285	879	3701
15	3911	2140	249	859	2782
20	5204	491	185	536	1931
30	4604	420	213	712	2151
50	7887	236	175	1364	1614
100	12540	159	117	564	940

Nota. ND No disponible

Tabla 5. Producción de AGV's para cada ST para la FORSU 3.

ST	Acético	Propiónico	Isobutírico	Butírico	Isovalérico
5	8123	156	134	1193	119
10	8700	206	149	1610	136
15	7085	188	138	3303	58
20	9847	195	295	843	82
30	9767	168	116	578	40
50	7038	251	2348	2814	134
100	5519	18	313	679	133

Para todos los casos los AGV's producidos en mayor cantidad fueron el butírico y el acético. La producción de AGV's está ligada íntimamente con el pH y a su vez con la capacidad amortiguadora dentro del sistema, por lo que es muy importante mantener el pH sin una variación que pudiera afectar negativamente la producción de hidrógeno. Las concentraciones de AGV's obtenidas son elevadas, sin

embargo gracias a la solución amortiguadora agregada la producción de AGV no afectó significativamente la producción de hidrógeno.

La importancia de los AGV radica que son un producto terminal de proceso y que se pueden aprovechar para la generación de más energía, esto se podría lograr conectando un segundo reactor que aproveche los AGV's generados para la producción de metano o para la generación de más hidrógeno. La mayor problemática a la que se enfrentaría es el diseño del sistema, ya que podría elevar los costos y rompería el balance energético.

5.3.6 Producción de hidrógeno a las 40 h

Debido a que la máxima producción de hidrógeno se lleva a cabo en distintos tiempos para cada una de las concentraciones iniciales de hidrógeno, se decidió hacer el análisis de los resultados a las 48h del experimento para homogeneizar la producción de hidrógeno en todos los casos. La figura 13 presenta la producción de H_2 a diferentes concentraciones de ST de las diferentes fracciones evaluadas, en un tiempo de 40 h. Es posible observar que para bajas concentraciones de ST (5-15 g/L) la mayor producción de biogás se presenta en la FORSU 3. En valores iniciales menores de 30 g/L las tres fracciones presentan una buena producción de H_2 entre 3 y 6 mmol. En el caso de 50 y 100 g/L la mejor producción se observó en la FORSU 1.

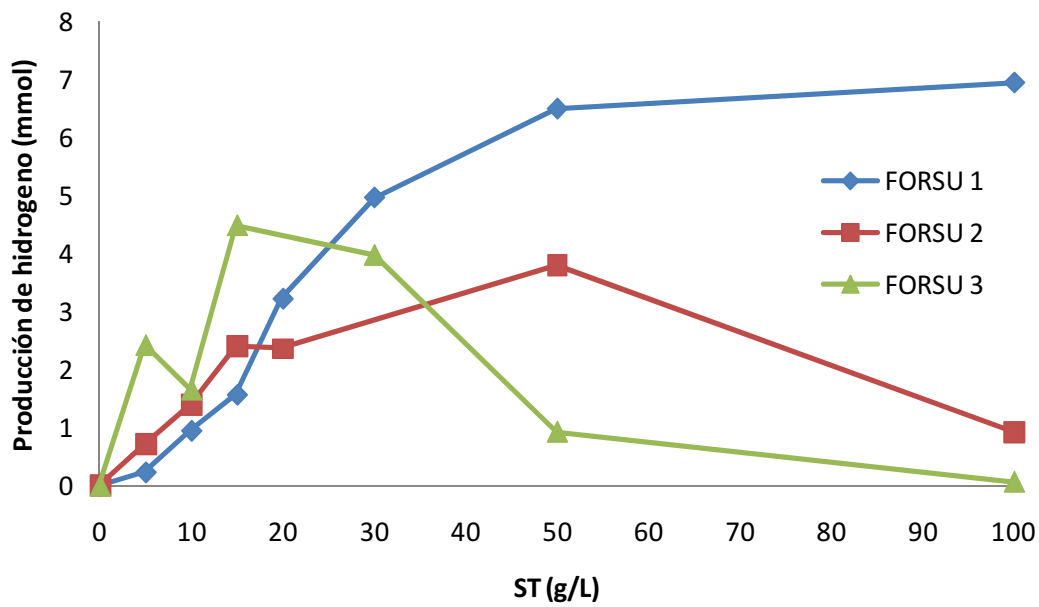


Figura 13. Producción de hidrógeno a las 40 h.

Los resultados obtenidos y el trabajo experimental de laboratorio, indican que en la operación práctica de un biorreactor en continuo para la producción de H_2 , será mejor trabajar en concentraciones menores a 30 g/L, ya que a más de 50 g/L la FORSU empleada es muy espesa y compacta haciendo difícil su manejo y agitación. Así mismo, a mayores concentraciones de ST iniciales, la producción de AGV's será mayor pudiendo producir una inhibición en el proceso, aunado se sabe que la cantidad de partículas afectaría negativamente.

Se esperaría que la producción de hidrógeno fuera mejor para los ST donde la FORSU es más fina, ya que es más biodisponible. Sin embargo como se observa en la gráfica 13 la curva demostró que la FORSU 3 fue la mejor sólo para las concentraciones menores a 30 g/L ST. Para el caso de concentraciones superiores a 30 g/L de ST, la FORSU 1 presentó la mejor producción volumétrica de H_2 .

6

Conclusiones

El principal aporte de esta tesis fue describir los valores óptimos para la producción de H₂ a partir de FORSU con distintos tamaños de partículas, para sentar bases de los parámetros que se deberán tomar en cuenta al operar un biorreactor piloto de manera continua.

Los resultados demostraron que la producción de hidrógeno a partir de la FORSU es viable y que el tamaño de partícula es un parámetro que influye sobre el porcentaje y producción de hidrógeno.

Se demostró que la solución buffer de citratos 1M controló de manera adecuada el pH de la prueba, por lo cual se recomienda emplearlo como buffer en futuros experimentos de producción de hidrógeno.

La fracción FORSU 1 produjo la mayor cantidad de H₂ en comparación con los otros tamaños de partículas. La producción máxima de H₂ depende de la concentración inicial de ST, siendo la mejor 100 y 50 y 15 g/L para FORSU 1, 2 y 3 respectivamente.

La fracción orgánica de residuos sólidos tiene un gran potencial para la generación de hidrógeno, además tiene una alta generación de AGV's, que puede traducirse en una mayor generación de energía.

Los experimentos realizados en esta tesis servirán de base en futuros experimentos para el arranque de biorreactores en continuo para la producción de H₂.

7

Referencias

- Buitrón Méndez G., Carbajal Monroy C. 2009. Producción de hidrógeno a partir de aguas residuales. *Revista Digital Universitaria* 10 (6): 1-9. (<http://www.revista.unam.mx/vol.10/num8/art50/art50.pdf>)
- Campos A. 2001. Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria. *Tesis doctoral* Universidad de Lleida.
- Dong L., Zhenhong Y., Yongming S., Xiaoying K., Yu Z. 2009. Hydrogen production characteristics of the organic fraction of municipal solid wastes by anaerobic mixed culture fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy* 34: 812-820.

- Fountoulakis, M.S.; Manios, T. 2009. Enhanced methane and hydrogen production from municipal solid waste and agro-industrial by-products co-digested with crude glycerol. *Bioresource Technology* 100: 3043-3047.
- García-Jarquín, B. 2009. Diseño de un proceso de lombricomposteo utilizando el método QFD (Quality Function Deployment para el establecimiento de una planta piloto en la UTM. *Tesis de ingeniería*. Universidad Tecnológica de la Mixteca.
- Gomez X., Cuetos M.J. Prieto A., Moran J.I. 2009. Bio-hydrogen production from waste fermentation: Mixing and static conditions. *Renewable Energy* 34. 970–975.
- Kim S.-H., Han S.-K., Shin H.S. 2004. Feasibility of hydrogen production by anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge. *International Journal of Hydrogen Energy* 29: 1607-1616.
- Lay J.-J., Fan K.-S., Chan J.-I., Ku C.-H. 2003. Influence of chemical nature of organic wastes on their conversion to hydrogen by heat-shock digested sludge. *International Journal of Hydrogen Energy* 28: 1361-1367.
- LGPGIR. 2007. Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos. *Nueva ley publicada en el diario oficial de la federación el 8 de octubre de 2003*. Texto vigente. Última reforma publicada 19-06-2007.
- Martí-Ortega, N. 2002. Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process. Press Inc. Boca Ratón, Florida. USA. 25 pp.
- Meraz R. L. 2010, Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, Procuraduría Ambiental del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal.
- Nandi R., Sengupta S. 1998. Microbial production of hydrogen: an overview. *Critical Reviews in Microbiology* 24 (1): 61-84.
- Nath K., Das D. 2004. Improvement of fermentative hydrogen production: various approaches. *Appl Microbiol Biotechnol* 65: 520-529.
- Noike T., Mizuno, O. 2000. Hydrogen fermentation of organic municipal wastes. *Water Science and Technology* 42 (12): 155-162.

- Ruiz, I., Álvarez, J.A., Soto, M., 2000 El potencial de la digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales urbanas y efluentes de baja carga orgánica. Coruña: Universidad de Coruña. Facultad de Ciencias.
- Saval S., Noyola A. (1992) Aportaciones de la biotecnología al tratamiento anaerobio de aguas residuales. *Biotecnología*, 2(5-6), 155-172.
- SCS Engineers. 2005. Estudio de pre-factibilidad para la recuperación de biogás y producción de energía del relleno sanitario Querétaro, Querétaro, México. Reporte banco mundial. File No. 02204055.02 ToC-2. Página web: http://www.bancomundial.org.ar/lfg/archivos/PrefeasibilityStudies/Spanish_Portuguese/Queretaro_PreFeasibility_Study_Spanish.pdf
- Valdez-Vazquez I., Poggi-Varaldo H.M. 2009. Alkalinity and high total solids affecting H₂ production from organic solid waste by anaerobic consortia. *International Journal of Hydrogen Energy* 34: 3639-3646.
- Villaseñor C, J. 2001. Eliminación biológica de fósforo en aguas residuales urbanas. Tesis de doctorado. Universidad de Castilla, 364 p.
- Wang B., Wan W., Wang J. 2009. Effect of ammonia concentration on fermentative hydrogen production by mixed cultures. *Bioresource Technology* 100: 1211-1213.
- Zoetemeyer R.J., Arnoldy P., Cohen A., Boelhouwer C. 1982. Influence of temperature on the anaerobic acidification of glucose in a mixed culture forming part of a two-stage digestion process. *Water Research* 16: 313-321.