

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**OPCIÓN I.- TESIS**

**TRABAJO PROFESIONAL**

**“Diseño e implementación de un reactor de lecho  
semifluidizado inverso para el tratamiento anaerobio  
de un efluente de la industria citrícola”.**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**PRESENTA:**

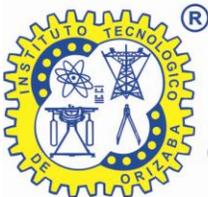
*I.Q. Emilio Domínguez Hernández*

**DIRECTOR DE TESIS:**

*M.I. Norma Alejandra Vallejo Cantú*

**CODIRECTOR DE TESIS:**

*Dr. Alejandro Alvarado Lassman*



SEP

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



Subsecretaría de Educación Superior  
Tecnológico Nacional de México  
Instituto Tecnológico de Orizaba

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

FECHA: 03/02/2016  
DEPENDENCIA: POSGRADO  
ASUNTO: Autorización de Impresión  
OPCIÓN: I

C. EMILIO DOMÍNGUEZ HERNÁNDEZ  
CANDIDATO A GRADO DE MAESTRO EN:  
CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

"DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN REACTOR DE LECHO SEMIFLUIDIZADO  
INVERSO PARA EL TRATAMIENTO ANAEROBIO DE UN EFLUENTE DE LA  
INDUSTRIA CITRÍCOLA" .

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E

  
M.C. MA. ELENA GARCÍA REYES  
JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ggc





"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

FECHA : 02/02/2016

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

**C. M.C. MA. ELENA GARCÍA REYES**  
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACION.  
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C. :

**EMILIO DOMÍNGUEZ HERNÁNDEZ**

la cual lleva el título de:

**"DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN REACTOR DE LECHO SEMIFLUIDIZADO  
INVERSO PARA EL TRATAMIENTO ANAEROBIO DE UN EFLUENTE DE LA INDUSTRIA  
CITRÍCOLA" .**

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : M.I. **NORMA ALEJANDRA VALLEJO CANTU**

\_\_\_\_\_  
FIRMA

SECRETARIO : DR. **ALEJANDRO ALVARADO LASSMAN**

\_\_\_\_\_  
FIRMA

VOCAL : DR. **JUAN MANUEL MENDEZ CONTRERAS**

\_\_\_\_\_  
FIRMA

VOCAL SUP. : DR. **DENIS CANTU LOZANO**

\_\_\_\_\_  
FIRMA

EGRESADO(A) DE LA MAESTRIA EN **CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA**

OPCION: I **Tesis**



## DEDICATORIAS

Un agradecimiento singular debo a mis asesores de tesis: el Dr. Alejandro Alvarado Lassman y la Maestra Norma A, Vallejo Cantú, que como profesores y directores de este trabajo, en todo momento me han orientado, animado, apoyado y corregido con un interés y una entrega que han sobrepasado, por mucho, todas las expectativas que como alumno deposite en ellos. A su vez agradezco al Dr. Arturo Alvarado Lassman por su invaluable apoyo para la realización de este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada con número 373947 para la realización de mis estudios de posgrado.

A mi alma mater el Tecnológico de Orizaba, espero poner siempre muy en alto su nombre y demostrar el gran semillero de talento que es.

Muy especialmente a mi mamá, por su apoyo incondicional e infinito amor a lo largo de toda mi vida.

A mi prometida Silvia Yanet Alonso Fabián, por su comprensión, cariño, paciencia y amor, dándome siempre ánimos para seguir adelante.

A mis queridos abuelitos aun cuando ya no están presentes, sé que se enorgullecen y celebran mis triunfos desde donde estén.

A mis compañeros y amigos por su gran apoyo durante la realización de esta tesis así como por su valiosa amistad: José Luis, Roa, Erick, Paty, Shamir y Cristal.

*“Adelante paso de vencedores”*

## RECONOCIMIENTOS

- *Estudio de la fluidización de un soporte limpio y colonizado en un Reactor de Lecho Semifluidizado Inverso (RLSFI)*. Coloquio de Investigación Multidisciplinario (CIM). Instituto Tecnológico de Orizaba, 23 Octubre 2015.
- *Diseño y arranque de un Reactor Anaerobio de Lecho Semifluidizado Inverso (RALSFI) para tratar un efluente citrícola*. Congreso de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Química. Tecnológico de Tapachula, 12 Noviembre 2015.

## RESUMEN

Diseño e implementación de un reactor de lecho semifluidizado inverso para el tratamiento anaerobio de un efluente de la industria citrícola

**Elaborado por:** I.Q. Emilio Domínguez Hernández

**Dirigida por:** M.I.Q. Norma Alejandra Vallejo Cantú

Dr. Alejandro Alvarado Lassman

Nuestro país es el cuarto productor de frutos cítricos a nivel mundial a su vez el estado de Veracruz es el primero a nivel nacional. Esto deja una bonanza económica muy grande pero también serios problemas ambientales por los residuos generados. En el presente trabajo se diseñó, construyó, arrancó y operó una modificación del Reactor de Lecho Fluidizado Inverso (RLFI), ocupando la semifluidización a través de la implementación de placas restringentes del lecho fluidizado.

A su vez se realizaron pruebas hidrodinámicas con diversas geometrías de placas, encontrando que la de orificio circular de 6 mm mostro un buen comportamiento, posteriormente se evaluó el efecto que tiene tanto la biopelícula así como el biogás dentro de la expansión del lecho. Los resultados muestran el cambio notable en las condiciones de fluidización al momento de producir biogás, llegando a fluidizar el lecho hasta con un 75% menos de velocidad descensional de líquido, traduciéndose en un marcado ahorro energético.

Durante la operación en continuo por 190 días del RLSFI con sustrato cítrico, este logró llegar a operar con Cva de hasta 40 gDQO/L\*d sin mostrar problemas de acidificación u operacionales, con remociones de DQO de hasta el 60%, alcanzando producciones de biogás diarias de hasta 30 L. Esto demuestra que operar los RLFI en régimen semifluidizado trae consigo el aumento de remoción, estabilidad biológica y capacidad de tratamiento con altas cargas orgánicas.

**ABSTRACT**

Design and implementation of a inverse semifluidized bed reactor for anaerobic treatment of an effluent from the citrus industry

**By:** I.Q. Emilio Domínguez Hernández

**Advisor(s):** M.I.Q. Norma Alejandra Vallejo Cantú

Dr. Alejandro Alvarado Lassman

Our country is the fourth largest worldwide producer of citrus to turn the state of Veracruz is the first nationally. This leaves very large economic prosperous but also serious environmental problems in the poor management of the waste that is produced by these industries. In this work it was designed, constructed, started and operated a modification of the Inverse Fluidized Bed Reactor (IFBR), using semifluidization through the implementation of plates in order to restrict the fluidized bed.

In turn hydrodynamic tests were performed with different geometries of plates to find the best performers, finding that the circular orifice of 6 mm showed a good performance, and then the effect of the biofilm and biogas were evaluated in the bed expansion. The results show the remarkable change in fluidization conditions when producing biogas, coming to fluidize the bed up to 75% less descensional liquid velocity, resulting in a marked energy savings.

During continuous operation 190 days of RLSFI citrus substrate, this could reach volumetric load applied up to 40 gCOD / L\*d without showing acidification or operational problems with COD removal of up to 60% to productions biogas daily up to 30 L. This confirms that operating in semifluidized regime brings increased organic removal, biological stability and capacity of treatment with high organic loads.

---

---

**ÍNDICE**

	Pág.
Lista de figuras .....	IV
Lista de tablas.....	VII
Nomenclatura.....	IX
Introducción.....	1
 <b>CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	
1.1 Panorama de la industria citrícola.....	4
1.1.1 La naranja en México y el mundo.....	5
1.1.2 La naranja en el estado de Veracruz.....	7
1.1.3 Variedades de naranjas.....	9
1.1.4 El jugo de naranja.....	10
1.2 Composición de la naranja.....	12
1.2.1 La cáscara de naranja.....	12
1.3 Impacto ambiental de la industria citrícola.....	14
1.3.1 Características del residuo cítrico.....	15
1.3.2 Descripción del proceso en la industria cítrica.....	17
1.4 Usos actuales del residuo cítrico.....	19
1.4.1 Producción de energía.....	19
1.4.2 Aceites esenciales.....	20
1.4.3 Material adsorbente.....	20
1.4.4 Alimento de ganado.....	21
1.5 La digestión anaerobia.....	21
1.5.1 Hidrólisis.....	21
1.5.2 Acidogénesis y acetogénesis.....	22
1.5.3 Metanogénesis.....	22
1.5.4 Biogás.....	23
1.5.5 Digestión anaerobia de los residuos cítricos.....	23

1.6 La fluidización.....	24
1.6.1 El fenómeno de la fluidización.....	25
1.6.2 La semifluidización.....	25
1.6.3 La biopelícula en la fluidización.....	26
1.6.4 Reactores de lecho fluidizado inverso.....	27
1.6.5 Ventajas de los RLF. ....	28
1.6.6 Aplicación de los reactores de lecho fluidizado inverso.....	28

## **CAPÍTULO 2. MATERIALES Y METODOS**

2.1 Diseño y construcción del RLSFI.....	34
2.2 Diseño y construcción de las placas y bastón colocador.....	34
2.3 Acondicionamiento y preparación del inóculo.....	35
2.4 Pruebas hidrodinámicas de soporte dentro del RLSFI.....	35
2.4.1 Expansión con soporte limpio.....	35
2.4.2 Expansión con soporte colonizado sin biogás.....	37
2.4.3 Expansión con soporte colonizado con biogás.....	37
2.5 Inoculación y arranque del RLSFI.....	37
2.6 Preparación del sustrato.....	38
2.7 Estabilización y operación del RLSFI.....	39
2.7.1 Determinación de pH.....	39
2.7.2 Determinación de sólidos totales y sólidos volátiles.....	39
2.7.3 Determinación de porcentaje de metano.....	39
2.7.4 Determinación de DQO.....	40
2.7.5 Determinación de MVA.....	40
2.8 Aumento paulatino de la carga.....	40
2.9 Seguimiento hidrodinámico del RLSFI en operación continua.....	41

## **CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

3.1 Diseño y construcción del RLSFI.....	43
3.1.1 Características internas del RLSFI .....	44

---

---

3.1.2 Características del lecho fijo.....	45
3.1.3 Características del difusor.....	46
3.2 Diseño y construcción de las placas.....	47
3.2.1 Placa de rejilla 1 mm.....	47
3.2.2 Placa de orificio de 2.5 mm.....	48
3.2.3 Placa de orificio de 1 mm.....	48
3.2.3 Placa modificada orificio 6 mm.....	49
3.2.4 Diseño de los bastones colocadores.....	49
3.3 Pruebas hidrodinámicas de expansión.....	52
3.3.1 Pruebas hidrodinámicas con soporte limpio.....	52
3.3.2 Pruebas hidrodinámicas con soporte colonizado.....	54
3.3.3 Pruebas hidrodinámicas con soporte colonizado y presencia de biogás.....	56
3.3.4 Comportamiento hidrodinámico del lecho durante la operación continua del RLSFI.....	58
3.3.4.1 Efecto de la biopelícula sobre la fluidización del soporte.....	58
3.3.4.2 Efecto de la producción de biogás sobre la fluidización del soporte .....	59
3.4 Inoculación y arranque del RLSFI.....	63
3.5 Operación en continuo del RLSFI.....	64
3.5.1 Carga Volumétrica Aplicada (Cva).....	64
3.5.2 DQO del influente y efluente del RLSFI.....	66
3.5.3 Comportamiento del pH.....	64
3.5.4 Remoción de DQO.....	70
3.5.5 Producción de biogás.....	72
3.5.6 Rendimiento de metano (Y).....	75
3.6 Comparación del RLSFI con trabajos previos.....	77
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>82</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>84</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>86</b>

**LISTA DE FIGURAS**

		Pág.
Figura 1.1	Estados productores de naranja en 2012	8
Figura 1.2	Producción mundial de jugo de naranja	11
Figura 1.3	Diagrama del proceso de jugo de naranja	18
Figura 1.4	Diferencia entre los lechos fluidizados	26
Figura 2.1	Metodología utilizada para el desarrollo de esta tesis	33
Figura 2.2	Soporte colonizado extraído del RLSFI	35
Figura 2.3	Extendosphere limpio dentro del RLSFI	36
Figura 2.4	Extendosphere totalmente expandido dentro del RLSFI	36
Figura 2.5	Sustrato de cascara de naranja	38
Figura 3.1	Diagrama esquemático del RLSFI	44
Figura 3.2	Diferentes zonas dentro del RLSFI	45
Figura 3.3	Características del lecho fijo del RLSFI	46
Figura 3.4	Diseño del difusor del RLSFI	46
Figura 3.5	Diagrama de placa de rejilla diseñada para el RLSFI	47

---

---

Figura 3.6	Diagrama de placa de poro grande diseñada para el RLSFI	48
Figura 3.7	Diagrama de poro pequeño diseñada para el RLSFI	49
Figura 3.8	Descripción y uso del bastón de sujeción	50
Figura 3.9	Herramienta diseñada para apretar los cabezales	51
Figura 3.10	Colocación de las placas dentro del RLSFI	51
Figura 3.11	Resultados de pruebas de fluidización con soporte limpio y diferentes placas	52
Figura 3.12	Soporte limpio retenido por la placa de orificio de 1 mm	53
Figura 3.13	Placa de orificio de 1 mm después de operar al RLSFI con soporte colonizado	54
Figura 3.14	Resultados de pruebas de fluidización con soporte colonizado y placa de orificio de 6 mm	55
Figura 3.15	Placa de orificio de 6 mm reteniendo soporte colonizado	56
Figura 3.16	Placa de orificio de 6 mm en presencia y ausencia de biogás	57
Figura 3.17	Aumento de la MVA al soporte durante la operación del RLSFI	58
Figura 3.18	Comparación de la biopelícula adherida al soporte en el día 1 y en el día 170	59

---

---

Figura 3.19	Relación entre la producción diaria de biogás y la velocidad descensional utilizada dentro del RLSFI	60
Figura 3.20	Relación entre la velocidad descensional y el porcentaje de expansión dentro del RLSFI	61
Figura 3.21	Relación entre la velocidad descensional y velocidad de biogás dentro del RLSFI	62
Figura 3.22	Cva aplicada al RLSFI durante la operación en continuo	65
Figura 3.23	DQO de influente y efluente del RLSFI durante la operación en continuo	67
Figura 3.24	Comportamiento del pH dentro del RLSFI durante la operación en continuo	68
Figura 3.25	Comportamiento de la remoción de DQO y Cva del RLSFI durante la operación en continuo	70
Figura 3.26	Producción de biogás Cva del RLSFI durante la operación en continuo	73
Figura 3.27	Composición del biogás producido en el RLSFI durante la operación en continuo	74
Figura 3.28	Rendimiento de metano en el RLSFI	76

**LISTA DE TABLAS**

		Pág.
Tabla 1.1	Historial de producción nacional de naranja en México	6
Tabla 1.2	Producción nacional de naranja en México	7
Tabla 1.3	Producción de naranja del estado de Veracruz	9
Tabla 1.4	Composición nutricional de naranja Valenciana	13
Tabla 1.5	Características químicas de la cáscara de naranja	14
Tabla 1.6	Características del residuo cítrico de cáscara de naranja base seca y húmeda	16
Tabla 1.7	Características del residuo de la industria de la naranja	16
Tabla 2.1	Micronutrientes adicionados al sustrato cítrico	38
Tabla 2.2	Parámetros monitoreados en la operación del RLSFI	39
Tabla 3.1	Características del RLSFI	43
Tabla 3.2	Características del sustrato pre-hidrolizado de RSU alimentado al RLSFI	63
Tabla 3.3	Fases de operación del RLSFI	64
Tabla 3.4	Cva manejadas por trabajos previos con residuo cítrico	65
Tabla 3.4	Remociones de DQO alcanzadas por trabajos previos	72

Tabla 3.5	Rendimientos de metano alcanzadas por trabajos previos con residuo cítrico	77
Tabla 3.6	Comparación del RLSFI con trabajos previos	78

## NOMENCLATURA

<b>Abreviatura</b>	<b>Significado</b>	<b>Unidad</b>
DQO	Demanda Química de Oxígeno	g/L
DQO <sub>T</sub>	Demanda Química de Oxígeno Total	g/L
DQO <sub>s</sub>	Demanda Química de Oxígeno Soluble	g/L
ST	Sólidos Suspendidos Totales	g/L
SV	Sólidos Suspendidos Volátiles	g/L
MVA	Materia Volátil Adherida	g biomasa/ mL de soporte
TRH	Tiempo de Retención Hidráulico	Días
Cva	Carga volumétrica aplicada	g DQO/L día
Y <sub>CH<sub>4</sub></sub>	Rendimiento de metano	L <sub>metano</sub> / g DQO <sub>removida</sub>
T	Temperatura	°C
RLSFI	Reactor de Lecho Semifluidizado Inverso	
RLF	Reactor de Lecho Fluidizado	
RLFI	Reactor de Lecho Fluidizado Inverso	

## INTRODUCCIÓN

La industria cítrica en México genera una importante derrama económica en varios estados de la república, principalmente en el estado de Veracruz, el cual es el mayor productor cítrico del país (SIAP, 2014). En los últimos años la demanda de naranja y jugo de naranja se ha ido incrementando no solo a nivel nacional sino a nivel internacional

La producción de jugo de naranja a nivel industrial da como resultado la generación aproximada de 8 a 20 millones de toneladas por año de residuo sólido y líquido (Rezzadori et al, 2012) el cual sigue siendo considerado como desecho. En general los residuos cítricos no tienen valor económico, aun cuando su composición es rica en azúcares solubles, celulosa, hemicelulosa, pectina y aceites esenciales.

La digestión anaerobia ha probado ser una excelente opción para dar tratamiento a efluentes con altas cargas orgánicas y de esta manera generar biogás y poder reducir el efecto contaminante. Para que la digestión anaerobia pueda ser una verdadera opción atractiva, esta se debe de llevar a cabo de manera óptima y controlada, lo cual exige una constante optimización en los diseños de los reactores donde se lleva a cabo dicho bioproceso.

Los reactores de lecho fluidizado han probado ser una buena alternativa para poder tratar efluentes a través de la digestión anaerobia. Diversos estudios actuales se han dirigido a estudiar su variante, los reactores de lecho fluidizado inverso (RLFI) y su implementación para tratar diferentes sustratos como las aguas provenientes de la industria cervecera Alvarado–Lassman et al., (2008), los residuos de la industria vinícola García – Calderón et al., (1998), aguas sintéticas Sowmeyan y Swaminathan (2008) y Castilla et al., (2000), residuos de la industria del destilado de vino Buffiere et al., (2000), residuos de lactosuero Anarnaiz et al., (2002), los cuales demostraron que estos tipos de reactores son una buena opción en el tratamiento de residuos orgánicos.

Precisamente este trabajo busca analizar un nuevo tipo de reactor de lecho semifluidizado inverso para poder dar tratamiento a los efluentes de una industria citrícola de la región.

Para ello se diseñó y construyó un reactor de lecho fluidizado inverso al cual se le adaptaron unas placas especiales que restringen el lecho, de esta manera se logra una semifluidización con la cual se busca obtener mejores resultados en el rendimiento y desempeño del reactor en general.

En el capítulo 1 se presenta el panorama actual de la industria citrícola en nuestro país y especialmente en el estado de Veracruz, posteriormente se analiza la problemática ambiental que genera la industria cítrica para finalmente analizar el papel de la digestión anaerobia y los reactores RLFi en el tratamiento de estos efluentes.

En el capítulo 2 se presenta los materiales y las técnicas que se implementaron para diseñar, construir, arrancar, estabilizar y evaluar el rendimiento del reactor de lecho semifluidizado inverso.

Finalmente en el capítulo 3 se presentan los resultados obtenidos de esta tesis, así como el análisis, comparación y discusión de los mismos, a su vez se presenta la bibliografía consultada.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar e implementar un Reactor de Lecho Semifluidizado Inverso (RLSFI) para dar tratamiento a un efluente citrícola y comparación con un Reactor de Lecho Fluidizado Tradicional.

### **OBJETIVOS PARTICULARES**

- Diseño y construcción de un reactor anaerobio de lecho semifluidizado inverso.
- Evaluación de diferentes arreglos para el lecho semifluidizado.
- Alimentación y estabilización del reactor anaerobio de lecho semifluidizado inverso con un sustrato citrícola.
- Comparación de resultados contra un Reactor de Lecho Fluidizado tradicional

# **CAPÍTULO 1**

## **FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

## **CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

### **1.1 Panorama de la industria citrícola**

En los últimos años la industria citrícola nacional ha experimentado un gran auge, situando a México dentro de los grandes productores internacionales y dejando una gran derrama económica en los estados y municipios que tradicionalmente se dedican a ello. Aunado a este desarrollo económico también han venido severos problemas ambientales debido al mal manejo que se le da a los grandes volúmenes de desechos que dicha industria produce, los cuales debido a sus características fisicoquímicas resultan ser una gran fuente contaminante para el suelo y principalmente el agua. En los últimos años los esfuerzos científicos en el área de ingeniería ambiental han tratado de revalorizar estos residuos y a su vez darles algún tipo de tratamiento que ayude a paliar su efecto sobre el ecosistema.

La naranja es una fruta cítrica consumida en grandes cantidades alrededor del mundo, en su forma natural sin cáscara o como jugo. Es asociada generalmente con un bajo costo y contiene muchos nutrientes incluyendo vitamina C, A y B, minerales (calcio, fósforo y potasio), fibra dietética y muchos fitoquímicos incluyendo flavonoides, aminoácidos, ácidos fenólicos y carotenoides. (Rezzadori et al., 2012)

En la actualidad, los cítricos representan el cultivo de mayor valor en términos de comercio internacional. Existen dos mercados claramente distinguibles dentro de este sector; el mercado de frutos frescos y el mercado de jugos. En el mercado de frutos frescos predomina el comercio de la naranja, sin embargo, en las dos últimas décadas ha aumentado considerablemente el comercio internacional de otros cítricos pequeños, fundamentalmente de tangerinas, clementinas y mandarinas. (Díaz - Camino, 2010)

### 1.1.1 La naranja en México y el mundo

México es el cuarto productor de cítricos en el mundo, después de Brasil, Estados Unidos y China. El país tiene una gran historia en la producción de la naranja, ésta empieza desde el siglo XVII cuando los españoles trajeron la producción de cítricos al Nuevo Mundo. A principios del siglo XX, la producción de cítricos prosperó en Nuevo León donde los terratenientes aplicaron su relativa experiencia técnica en el cultivo de naranjas y su irrigación. (Consejo Citrícola Mexicano, 2007). El cultivo de cítricos es una industria preponderante y significativa económicamente en Estados Unidos, Brasil, México, China, India, Irán y la mayor parte del mediterráneo incluida España y Grecia. (Koppar y Pullammanappallil, 2013).

Los cultivos cítricos son los más abundantes en el mundo, alcanzando una cifra de 120 millones de toneladas de naranja, limones y mandarinas. En México el cultivo de naranja es una gran fuente industrial además de ser una fuente de ingreso económica para las zonas productoras. Únicamente en 2010, la producción de naranja alcanzó los 4 millones de toneladas, de la cual aproximadamente el 40% se convierte en residuos sólidos. En este contexto la disposición de estos residuos es una gran preocupación ambiental. (López - Velázquez et al., 2013)

La naranja se encuentra establecida en poco más de 300 mil hectáreas, de las cuales se obtienen alrededor de 4 millones de toneladas del fruto, con un valor aproximado de 6 mil mdp. Cerca de un 73% de la superficie es de temporal y produce el 66% del volumen (SHCP, 2014). Veracruz es el principal productor de cítricos, contribuyendo con un 38% de la superficie plantada en el país. Seguido en importancia por San Luís Potosí, Michoacán, Tamaulipas, Nuevo León, Colima, Tabasco, Oaxaca, Yucatán y Puebla; estos 10 estados en conjunto representan el 91% del total de cítricos en el país, sin embargo el comportamiento de los rendimientos y los precios que se logran en cada estado varía

considerablemente y están relacionados al nivel de tecnificación y grado de desarrollo en la actividad primaria. (CONCITVER, 2014).

México siempre se ha distinguido en el mundo por su producción citrícola ya que alcanza volúmenes superiores del orden de 4049.6 miles de toneladas en el 2013, dentro de la Tabla 1.1 se puede observar el historial de los últimos 13 años en cuanto a producción de naranja se refiere.

Tabla 1.1 Historial de producción nacional de naranja en México  
(SIAP-SAGARPA, 2013)

Año	Superficie (Miles de ha)		Volumen de Producción (Miles de ton)	Rendimiento (Ton / ha)	Precio medio rural (\$ / ton)	Valor de Producción (mdp)
	Sembrada	Cosechada				
2000	337.0	323.6	3,812.7	11.8	794.3	3,028.4
2001	340.3	326.8	4,034.9	12.3	605.0	2,441.1
2002	349.2	334.8	4,020.4	12.0	707.4	2,844.1
2003	345.5	332.3	3,845.9	11.6	888.5	3,417.0
2004	348.6	335.1	3,977.2	11.9	784.5	3,120.0
2005	336.8	317.3	4,112.7	13.0	652.1	2,681.7
2006	334.3	321.5	4,156.9	12.9	932.5	3,876.2
2007	336.2	330.3	4,248.7	12.9	1,070.8	4,549.3
2008	344.7	338.3	4,297.2	12.7	949.5	4,080.2
2009	339.4	333.6	4,193.5	12.6	992.2	4,160.7
2010	339.4	334.6	4,051.6	12.1	1,203.7	4,877.0
2011	335.5	330.2	4,079.7	12.4	1,447.1	5,903.8
2012	333.1	323.4	3,666.8	11.3	1,642.9	6,024.1
2013	336.3	314.6	4,049.6	12.9	N/D	N/D

Entre 2007 y 2012, el crecimiento promedio anual del volumen de producción de naranja fue negativo (-2.9%), lo que se debió principalmente a las sequías del año 2009 y 2012 que afectaron su producción. De acuerdo con cifras preliminares de SAGARPA, en 2013 el volumen de producción se incrementó en 10.4% respecto a 2012, para llegar a 4 millones de toneladas. Lo anterior en vista de una recuperación del rendimiento, que llegó a 12.9 ton/ha, que no se había alcanzado en 7 años. (SHCP, 2014)

La definición de las zonas productoras de cítricos en nuestro país, están bastante delimitadas. La mayoría de las entidades se encuentran en la costa del Golfo de México, abarca los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco y Yucatán, y cercanos a estos Nuevo León y Puebla como lo muestra la Tabla 1.2. Por el otro lado, en la costa del Pacífico encontramos a Sonora, Colima, Michoacán y Oaxaca. (CONCITVER, 2014)

Tabla 1.2 Producción nacional de naranja en México (SIAP-SAGARPA, 2013)

Ubicación	Superficie Sembrada	Superficie Cosechada	Producción	Valor Producción
	(Ha)	(Ha)	(Ton)	(Miles de Pesos)
Nuevo León	25,765.98	25,445.98	294,163.71	437,223.81
Puebla	23,267.00	19,757.00	209,561.07	231,588.91
San Luis Potosí	38,755.00	38,193.50	402,194.88	492,582.46
Tamaulipas	31,687.09	30,353.59	747,870.40	760,877.08
Veracruz	164,554.50	158,586.00	2,143,561.20	2,452,488.38
Yucatán	12,398.22	11,806.78	141,114.54	222,842.16
Otros estados	38230.89	36511.89	471501.82	914655.95

### 1.1.2 La naranja en el estado de Veracruz

El estado de Veracruz siempre se ha distinguido a nivel nacional por sus grandes volúmenes de producción citrícola, especialmente el de naranja fresca. Debido a las características climatológicas, de suelo, etc. El estado de Veracruz fue el mayor productor de naranja en 2012 (SIAP, 2013) acaparando cerca de la mitad del volumen nacional como lo muestra la Figura 1.1

El cultivo de naranja es una actividad preponderante en muchos municipios del estado, principalmente al norte del mismo, en localidades como Martínez de la Torre, Álamo Temapache y Papantla como se ve en la Tabla 1.3.

La economía de estos municipios se basa en la producción de productos cítricos principalmente de la naranja Valenciana, a su vez se encuentran ubicadas varias empresas de giro citrícola en las que se procesa el jugo de los cítricos y sus derivados tales como aceites esenciales, concentrados y néctares.

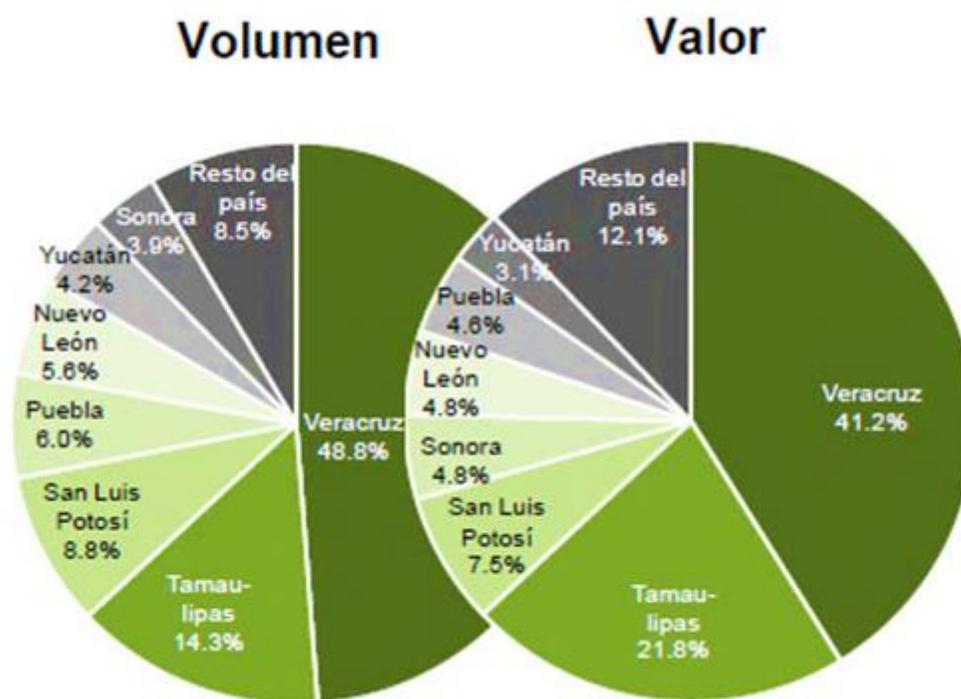


Figura 1.1 Estados productores de naranja en 2012 (SIAP-SAGARPA, 2013)

El cultivo de naranja es una actividad preponderante en muchos municipios del estado como se ve en la Tabla 1.3, principalmente al norte del mismo, en localidades como Martínez de la Torre, Álamo Temapache y Papantla es la actividad económica preponderante

Tabla 1.3 Producción de naranja del estado de Veracruz (SIAP-SAGARPA, 2013)

Ubicación	Superficie Sembrada	Superficie Cosechada	Producción
	(Ha)	(Ha)	(Ton)
Castillo de Teayo	10,702.00	9,382.00	121,875.00
Chicontepec	8,000.00	8,000.00	104,000.00
Gutiérrez Zamora	8,335.00	8,250.00	98,700.00
Martínez de La Torre	8,958.00	8,658.00	85,134.00
Papantla	15,450.00	15,325.00	184,900.00
Tihuatlán	13,912.00	13,831.00	172,887.50
Álamo Temapache	43,517.00	42,718.00	738,720.50
Otros municipios	28,167.50	25,597.50	306,022.70

### 1.1.3 Variedades de naranjas

La naranja se consume en forma fresca y en jugo, principalmente. Lo primero es característico de los países productores en vías de desarrollo y lo segundo, de los países industrializados. Para el consumo en fresco, en los países industrializados se prefieren las naranjas del grupo Navel (variedades: Navelina, Newhall, Washington, Thomson), que son frutas de gran tamaño, sin semilla, con sabor dulce y la corteza se pela fácilmente, lo que es requisito indispensable para ser aceptada como fruta de mesa.

Otras naranjas preferidas para el consumo en fresco son las del grupo Sangre, así llamado debido a la presencia de pigmentos rojos en la pulpa, en el zumo y, a veces, en la cáscara. Bajo condiciones de clima tropical y semitropical, difícilmente se desarrolla esta coloración, por lo que también son sólo pocos los países los que presentan una producción importante.

Sin embargo, las naranjas Navel y Sangre no son aptas para la industrialización; las primeras porque no son muy jugosas y además de que adquiere un sabor amargo; de las segundas, su jugo es demasiado oscuro.

La naranja Valencia del grupo Blancas tiene una doble aptitud, para el consumo en fresco y más aún, para jugo; por ello es la variedad líder en cuanto a su amplia distribución en México y a nivel mundial. La naranja Valencia es una excelente fruta para la industrialización, por sus contenidos de jugo y de azúcar. De este tipo de naranja los principales países productores son Brasil, EUA y México. Sin embargo, la naranja que predomina en México es la Valencia, cultivada bajo condiciones tropicales. (Gómez Cruz y Rindermann, 2007)

#### **1.1.4 El jugo de naranja**

México es un exportador neto de jugo de naranja, gracias a ser uno de los principales productores mundiales de esta fruta junto con Brasil y Estados Unidos.

En los últimos años el saldo positivo de la balanza se ha incrementado a más del doble, lo que muestra la importancia de este producto mexicano en el exterior. (Consejo Citrícola Mexicano, 2007)

Dentro de las exportaciones de jugo en nuestro país, las correspondientes a naranja han fluctuado entre el año 2000 y 2009 entre 36% y 13% del total de jugo de frutas y hortalizas exportado, teniendo un comportamiento variable. En el año 2009 este porcentaje alcanzó el 34%. En el periodo 2000-2009, las exportaciones de jugo de naranja se incrementaron 98.8% al pasar de 43.3 a 86.1 millones de litros exportados. Lo anterior implicó un crecimiento promedio al año de 7.9% en el periodo indicado. (Dirección General de Planeación Estratégica y Análisis Sectorial de México, 2010)

Estados Unidos fue el principal comprador de jugo de naranja mexicano en el año 2009 al adquirir el 71.7% de las exportaciones nacionales. Otros consumidores importantes de jugo de naranja producido en México fueron los Países Bajos

(12.3%), Japón (3.7%), Alemania (2.4%) y Venezuela (2.1%). De acuerdo al USDA, la producción mundial de jugo de naranja en el ciclo 2008/09 alcanzó los 2.28 millones de toneladas, lo que representó una disminución de 5.9% respecto al ciclo anterior. Los principales productores de jugo de naranja en el mundo en el ciclo 2008/09 fueron, en orden de importancia: Brasil, Estados Unidos, Unión Europea, México, y Sudáfrica, los cuales en su conjunto produjeron el 98.0% del total mundial. (Dirección General de Planeación Estratégica y Análisis Sectorial de México, 2010)

A pesar de que México todavía no es una potencia productora de jugo de naranja, cuenta con el tamaño de producción para poder colocarse en un futuro cercano entre los grandes productores y exportadores de productos cítricos no únicamente en cultivo si no en productos procesados industrialmente.

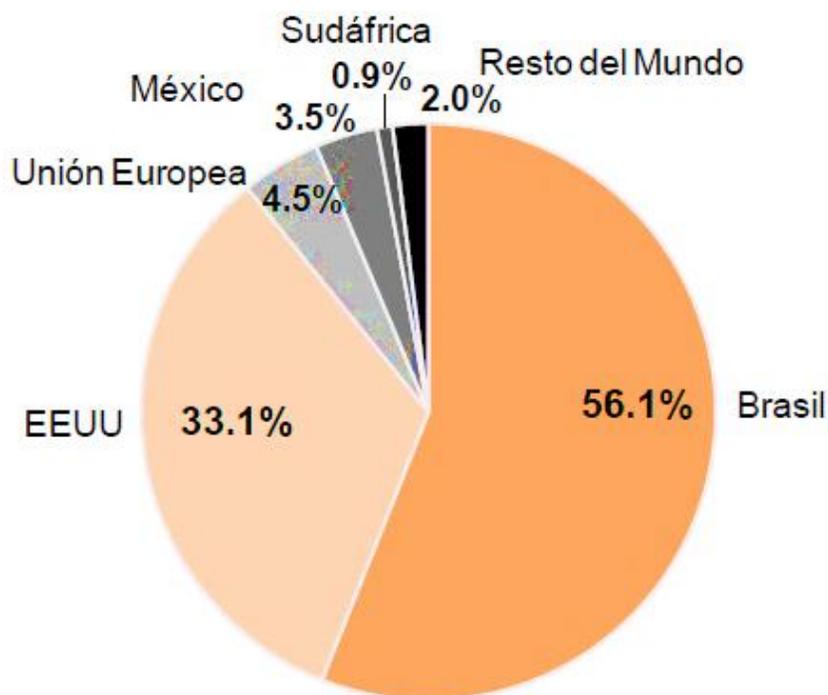


Figura 1.2 Producción mundial de jugo de naranja en 2009 (Dirección General de Planeación Estratégica y Análisis Sectorial de México, 2010)

## **1.2 Composición de la naranja**

En general la naranja está conformada en una gran cantidad por agua, contiene niveles moderados de proteínas, se le considera una buena fuente de fibra y vitamina C. Los principales carbohidratos incluyen monosacáridos como la glucosa y fructosa, oligosacáridos como la sucrosa y polisacáridos como las pectinas (Davies y Albrigo, 1994). En la naranja se encuentran también presentes pequeñas cantidades de compuestos bioactivos, tales como los terpenos, ácidos fenólicos y flavonoides.

### **1.2.1 La cáscara de naranja**

La composición de los frutos cítricos varía para cada zona o tipo de tejido. En la Tabla 1.4 se presenta la composición nutricional de la cáscara de naranja Valenciana. El albedo de la cáscara es rico en celulosa, hemicelulosa, lignina, sustancias pépticas y compuestos fenólicos, por su parte los constituyentes más importantes del flavedo son compuestos carotenoides y aceites. (Cancalon, 1994)

Las características fisicoquímicas de la cáscara de naranja lo vuelven un residuo de pH ácido, con elevado porcentaje de humedad y alta concentración de carbohidratos como se puede ver en la Tabla 1.5 de acuerdo a los datos que reporta Cerón-Salazar y Cardona-Alzate (2011)

Como se puede observar no solo la naranja es rica en nutrientes y minerales a su vez la cáscara de la naranja presenta grandes concentraciones de ellos. Cabe destacar el elevado contenido de agua presente en ambos productos. Las azúcares solubles presentes en la cáscara de naranja son glucosa, fructosa y sucrosa. Los polisacáridos insolubles de la pared celular están compuestos por pectina, celulosa y hemicelulosa, la pectina y la hemicelulosa son ricas en ácido galacturónico, arabinosa, galactosa también contiene pequeñas cantidades de xilosa y glucosa. (Rezzadori et al, 2012)

Tabla 1.4 Composición Nutricional de naranja Valenciana, cantidad contenida en 100 gramos (National Nutrient Database for Standard Reference USDA, 2007)

<b>NUTRIENTE</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>NARANJA CON CASCARA (sin semilla)</b>	<b>NARANJA SIN CASCARA (sin semilla)</b>	<b>CASCARA DE NARANJA</b>
<b>Componentes Principales</b>				
Agua	g	82.3	86.75	72.5
Energía	Kcal	63	47	97
Proteínas	g	1.3	0.94	1.5
Lípidos totales	g	0.3	0.12	0.2
Cenizas	g	0.6	0.44	0.8
Carbohidratos	g	15.5	11.75	25
Fibra total	g	4.5	2.4	10.6
Azúcares totales	g		9.35	
<b>Minerales</b>				
Calcio	mg	70	40	161
Hierro	mg	0.8	0.1	0.8
Magnesio	mg	14	10	22
Fosforo	mg	22	14	21
Potasio	mg	196	181	212
Sodio	mg	2	0	3
Zinc	mg	0.11	0.07	0.25
Cobre	mg	0.057	0.045	0.092
Manganeso	mg		0.025	
Selenio	mcg	0.7	0.5	1
<b>Vitaminas</b>				
Vitamina C	mg	71	53.2	136
Tiamina	mg	0.1	0.087	0.12
Riboflavina	mg	0.05	0.04	0.09
Niacina	mg	0.5	0.282	0.9

Tabla 1.5 Características químicas de la cascara de naranja (Cerón-Salazar y Cardona-Alzate, 2011)

Parámetro	Valor
Sólidos Solubles (° Brix)	7.1 ± 1.2
pH	3.93 ± 0.03
Total de acidez (g de ácido cítrico / 100 mL)	0.29 ± 0.03
Índice de Formol	34 ± 2.4
% de Humedad	85.9 ± 1.6
% de Grasas materia seca	1.55 ± 0.17
% de Cenizas materia seca	3.29 ± 0.19
% de Proteínas materia seca	6.16 ± 0.23
% de Carbohidratos materia seca	89 ± 1.1
Azúcares Neutrales	3.8 ± 0.3
Ácido Urónico	7.1 ± 0.9
Lignina	3.2 ± 0.4
% de Pectina materia seca	17 ± 5

### 1.3 Impacto ambiental de la industria citrícola

La producción de jugo de naranja a escala industrial produce una cantidad considerable de residuos sólidos y líquidos, alrededor de 20 millones de toneladas anuales, los cuales son considerados mayormente como desechos. En general los residuos de la naranja no tienen valor económico aun cuando su composición química es rica en azúcares solubles, celulosa, hemicelulosa, pectina y aceites esenciales que pueden ser la base de muchos procesos químicos. Durante la producción de jugo de naranja únicamente la mitad de la naranja en peso se transforma en jugo generando grandes cantidades de residuo (cáscara, pulpa, semillas, restos de naranja que no alcanzó los requerimientos de calidad, etc.).

Esta gran cantidad de residuos en muchos de los casos son esparcidos en terrenos, usados para alimentar el ganado o incinerados. La disposición incorrecta

de estos residuos produce una grave contaminación en términos de demanda bioquímica de oxígeno. (Rezzadori et al., 2012)

Las aguas residuales provenientes de las industrias cítricas típicamente contienen condensados, agua de lavado y licor proveniente del prensado. La forma más común de tratar este tipo de aguas residuales es usando lagunas o procesos de lodos activados, pero los elevados costos de combustible y electricidad así como la disposición de los lodos ha aumentado enormemente el interés por usar procesos anaeróbicos. (Koppar y Pullammanappallil, 2013).

El producto semisólido obtenido del jugo centrifugado esta mayormente compuesto por membranas residuales de endocarpio, vesículas y partículas de exocarpio. Este residuo también es rico en azúcares, fibras y otras sustancias residuales.

Este desecho (varias toneladas por día en una planta procesadora de mediano tamaño) causa severos impactos ambientales y económicos debido a su fermentabilidad. Además debido a su alto contenido de agua (alrededor de 86%) presenta dificultades para su secado en algún artefacto industrial, mientras que su gran contenido de materia orgánica impide su fácil disposición. (Tripodo et al., 2004)

### **1.3.1 Características del residuo cítrico**

La valorización de los residuos cítricos requiere del conocimiento de su composición química. Rezzadori y colaboradores (2012) mencionan que como resultado de sus análisis químico practicado a dicho residuo encuentran que está compuesto por 16.9% de azúcares solubles, 9.21% de celulosa, 10.5% de hemicelulosa y 42.5% de pectina, la cual es su principal componente. Siles y colaboradores (2010) antes de realizar experimentos sobre la digestión anaerobia de los residuos cítricos practicaron la caracterización al sustrato el cual fue residuo de cáscara de naranja, sus resultados se pueden ver en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6 Características del residuo cítrico de cáscara de naranja base seca y húmeda (Siles y colaboradores, 2010)

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR
<b>BASE HUMEDA</b>		
pH		3.42 ± 0.02
Ácidos Volátiles	mg de ácido acético /kg de suspensión	1950 ± 27
Humedad	%	79.83 ± 0.08
Solidos Totales	%	20.17 ± 0.08
Solidos Minerales	%	0.87 ± 0.03
Solidos Volátiles	%	19.31 ± 0.11
<b>BASE SECA</b>		
DQO	mg de Oxígeno/gramo	1085 ± 55
Nitrógeno Total	mg de Nitrógeno/gramo	12.24 ± 0.56
Nitrógeno Kjeldahl	mg de Nitrógeno/gramo	11.67 ± 0.24
Fosforo Total	mg de Fosforo/gramo	1.18 ± 0.03

A su vez Kaparoju y Rintala (2010) y González (2015) realizaron digestión anaerobia usando como sustrato residuo de la industria de la naranja, previamente caracterizaron el sustrato encontrando, los resultados se aprecian en la Tabla 1.7.

Tabla 1.7 Características del residuo de la industria de la naranja

PARAMETRO	UNIDAD	Kaparoju y Rintala (2010)	González (2015)
pH		3.5	4.1
Solidos Totales	%	11.6	19.36
Solidos Volátiles	%	95.4	95.4
DQO soluble	g/L	92	28.38
DQO total	g/L	164	34.64
Nitrógeno Kjeldahl	g/L	1.45	
Fosforo	g/L	0.97	1.147

Como se puede ver el efluente cítrico usado como sustrato para digestión anaerobia en múltiples experimentos tiene características comunes tales como su pH marcadamente ácido y su gran cantidad de carga orgánica.

Los resultados reportados de las caracterizaciones varían en función del sustrato utilizado ya sea la cáscara, la cáscara con pulpa o el agua residual de la industria citrícola.

El producto semi-sólido obtenido del centrifugado del jugo en las industrias cítricas está compuesto principalmente por membranas residuales de endocarpio, vesículas, albeldó y exocarpio de la naranja (Tripodo et al, 2004)

### **1.3.2 Descripción del proceso en la industria cítrica**

Durante la producción del jugo de naranja, cerca del 50% en peso de la naranja fresca se transforma en jugo, generando grandes cantidades de residuo (cáscara, pulpa, semilla, hojas y las naranjas que no cumplen los estándares de calidad) como se ve en la Figura 1.3, a su vez la mitad de naranja que se desecha lleva consigo aproximadamente un 82% de humedad. Esta gran cantidad de residuo en su mayoría de veces es esparcido como abono de tierras en áreas aledañas a la planta de producción o usado como alimento de animales de establo. Después de la extracción del jugo de naranja, la cáscara, las semillas y la pulpa son usualmente transformados en alimento de ganado. El residuo líquido es esparcido generalmente al ambiente, conocido como “aguas amarillas” resultando un grave problema ambiental debido a su elevada carga orgánica. (Rezzadori et al, 2012)

Migliavacca (2011) describe las partes del proceso en una planta citrícola que generan mayor cantidad de efluentes cítricos:

- Proceso de lavado, zaranda y prensado de cascara
- Centrifugas del proceso de extracción de aceite esencial y jugos concentrados
- Pre-secador y secador; del proceso de extracción de jugo de limón

- Procesos de lavados de columnas, filtros y planta en general cuando se termina la producción diaria
- Recambio de aguas de lavado

Debido a la naturaleza misma del proceso en una planta procesadora de jugo de naranja se generan enormes cantidades de aguas residuales, tal como lo muestra la Figura 1.3

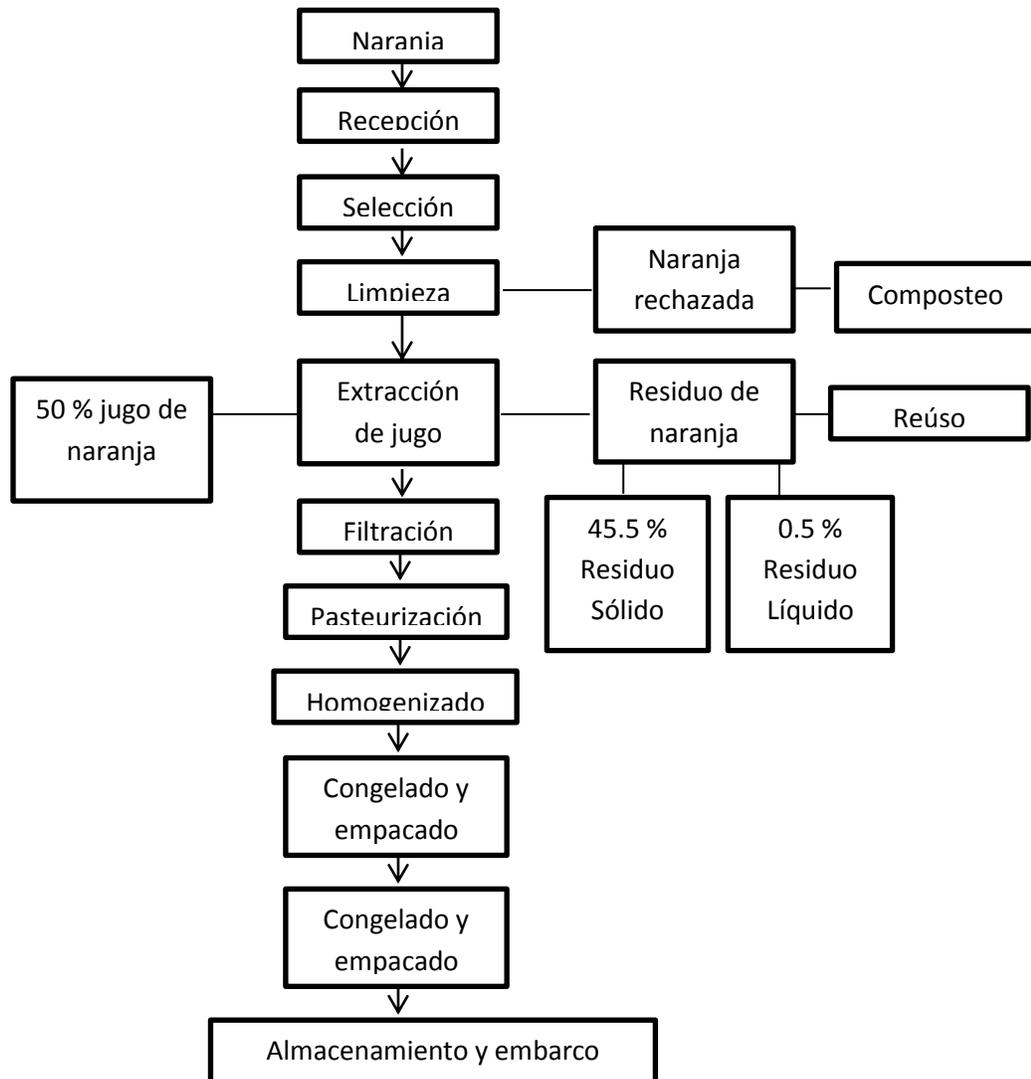


Figura 1.3 Diagrama del proceso de jugo de naranja (Rezaadori et al, 2012)

En general los residuos que se generan constan en su mayoría de residuos sólidos, aunque con una gran cantidad de humedad, por lo que tratarlos por procesos tradicionales (lagunas aerobias) resulta además de poco práctico muy costoso.

Los residuos cítricos tienen alto contenido orgánico consiste en varios carbohidratos solubles e insolubles, haciéndolos muy susceptibles a ser tratados por digestión anaerobia. Se han realizado numerosos procesos para tratar los residuos cítricos tales como la floculación química, aireación artificial, lagunas anaeróbicas, lodos activados. De estas aplicaciones, los procesos aerobios tales como los lodos activados han sido ampliamente estudiados y difundidos. (Koppar y Pullammanappallil, 2013).

#### **1.4 Usos actuales del residuo cítrico**

Los residuos cítricos tienen muchas aplicaciones como fuente de fibra, flavonoides, en aditivos alimentarios, como sustrato para fermentaciones, repelente de mosquitos. Aunque para revalorizar el residuo se requiere la instalación de procesos químicos, muchos de los cuales no son económicos. (Van Heerden et al., 2002)

Se han descrito en la literatura un gran número de propuestas para el uso de los residuos cítricos, estas incluyen su uso como fertilizante, en la obtención de aceites esenciales, obtención de productos químicos tales como la pectina, enzimas industriales y proteínas a su vez se ha probado su uso como adsorbente químico y como suplemento para la pulpa del papel. (Rezaadori et al, 2012)

##### **1.4.1 Producción de energía**

Estos residuos también tienen un alto valor energético y pueden ayudar a reducir la dependencia energética para la generación de vapor, calor o electricidad. A pesar del potencial uso de estos residuos hay pocos ejemplos de su aplicación reportados en la literatura ya sea en la forma en que son producidos o después

de su transformación. Antes de ser usados en la generación de energía térmica, los residuos sólidos de la naranja pueden ser convertidos en carbón lo cual amplía su rango de uso a la vez que facilita su transportación, almacenamiento y manejo. Según Tiene et al (2004) la pirólisis de la cáscara de naranja es posible, basado en la asociación gravimétrica con el carbón lo cual revaloriza altamente este residuo. Además la pulpa de la fruta puede ser usada para producir aceites esenciales.

Los residuos cítricos pueden ser utilizados para producir etanol, limoneno y otros productos de interés biotecnológico. Extensos trabajos han utilizado la hidrólisis enzimática para digerir estos residuos y maximizar la azúcar monomérica contenida, estos azúcares simultáneamente pueden ser convertidos en etanol por fermentación (Wilkins et al., 2007). Widmer et al (2010) estudiaron el uso de los residuos cítricos para producir etanol observando que el rendimiento de etanol basado en el contenido de azúcares después de hidrólisis enzimática por 48 horas rondaba entre el 76% y 94%.

#### **1.4.2 Aceites esenciales**

Otro uso productivo de este residuo es en la extracción de aceites esenciales, tales aceites volátiles son extraídos de la cáscara de naranja. (Donsi et al., 2011). Estos aceites esenciales tienen muchas aplicaciones en la industria farmacéutica y alimenticia, el D-limoneno es una fracción aceitosa y es considerada una de las fuentes más puras de terpeno monocíclico. (Corazza et al., 2001). Se pueden utilizar varias técnicas para obtener el aceite esencial; ya sea por extracción supercrítica, hidrodestilación, destilación y microondas.

#### **1.4.3 Material adsorbente**

La cáscara de naranja también ha tenido aplicación como material alternativo en la adsorción química de compuestos químicos y metales pesados en efluentes industriales. Ha sido demostrado que el uso de bagazo de naranja es un buen

adsorbente, Ajmal et al (2001) uso dicho producto para remover níquel de un efluente de la industrial de galvanoplastia, donde cerca del 93% del metal fue adsorbido. A su vez se ha probado para adsorber diversos metales tales como el cadmio, zirconio e incluso fosfatos.

#### **1.4.4 Alimento de ganado**

El salvado de la pulpa cítrica o de la cascara de naranja es otro uso demostrado de este residuo. Este cereal es obtenido a través del tratamiento del residuo sólido remanente de la extracción del jugo. El cereal peletizado es usado como complemento en la comida del ganado bovino debido a su alto contenido en fibra y su efecto promotor de la rumiación. (Corazza et al., 2001).

### **1.5 La digestión anaerobia**

La digestión anaerobia es un tratamiento biológico llevado a cabo en ausencia de oxígeno para estabilizar la materia orgánica mientras se produce biogás, el cual es una mezcla formada principalmente por metano y dióxido de carbono. (Mata-Álvarez et al., 2014). Consta esencialmente de 3 pasos metabólicos principales: hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis.

#### **1.5.1 Hidrólisis**

Durante la hidrólisis los componentes orgánicos macromoleculares como la celulosa, lípidos y proteínas son transformados hidrolíticamente a sustancias más simples tales como aminoácidos, azúcares y ácidos grasos. (Vaccari et al., 2006). Las partículas poliméricas y sustancias coloidales consisten principalmente en carbohidratos, lípidos y proteínas. Estas sustancias poliméricas que son moléculas insolubles consisten en pequeñas moléculas constituyentes unidas entre sí a través de enlaces químicos.

Las bacterias hidrolíticas son capaces de romper los enlaces químicos, hidrolisis es la separación (lisis) de compuestos complejos a componentes más fácilmente degradables.

### **1.5.2 Acidogénesis y acetogénesis**

Posteriormente la acidogénesis involucra la producción de ácidos grasos con bajo número de carbonos como el ácido acético, fórmico, propiónico y butírico a su vez también se genera hidrogeno gas, alcoholes, compuestos orgánicos nitrogenados y algunos compuestos sulfurados, el ácido más importante generado en esta etapa es el acetato. La presencia de compuestos orgánicos nitrogenados y sulfurados se debe a la degradación de aminoácidos y proteínas presentes en el sustrato.

El acetato puede ser producido no solamente por fermentación de compuestos orgánicos también se genera a través de la acetogénesis la cual ocurre simultáneamente junto con la acidogénesis. Aquí en esta etapa muchos ácidos y alcoholes, por ejemplo el butirato, propionato y etanol producidos durante la acidogénesis pueden ser degradados a acetato el cual es usado directamente por las bacterias metanogénicas, si las bacterias metanogénicas por algún motivo no transforman estos ácidos, se genera una acidez en el proceso la cual merma significativamente la producción de biogás. (Gerardi, 2003)

### **1.5.3 Metanogénesis**

Las bacterias metanogénicas convierten el acetato a metano y CO<sub>2</sub>, o reducen el CO<sub>2</sub> a metano. Estas transformaciones involucran dos tipos de bacterias que son las encargadas de llevar a cabo las transformaciones mencionadas anteriormente: acetotróficas e hidrogenotróficas. En menor proporción, compuestos como el metanol, las metilaminas y el ácido fórmico pueden también ser usados como sustratos del grupo metanogénico. (Vaccari et al., 2006).

La descomposición de compuestos orgánicos complejos a metano, procede tan rápido como las bacterias metanogénicas sean capaces de convertir los sustratos, generalmente el paso limitante es la producción y asimilación del acetato. (Gerardi, 2003).

#### **1.5.4 Biogás**

La digestión anaerobia de residuos con materia orgánica resulta en la producción de una mezcla de gases, colectivamente se les denomina biogás, el único gas con valor económico de esta mezcla es el metano por su poder calorífico. El metano puede ser usado como fuente de combustible, es un gas flamable, es inodoro y se quema limpiamente, el metano puro tiene una capacidad calorífica de 1 000 BTU/ft<sup>3</sup>. Aunque cuando el metano está mezclado con otros gases como en el caso del biogás, su poder calorífico decrece a valores próximos de 500 – 600 BTU/ft<sup>3</sup>. Cuando el bióxido de carbono se incrementa se reduce marcadamente la calidad del biogás pudiendo llegar incluso a no poder auto sustentar su llama. (Gerardi, 2003).

#### **1.5.5 Digestión anaerobia de los residuos cítricos**

La digestión anaerobia de los residuos cítricos (cáscara de naranja y aguas residuales) puede producir combustible en forma de gas metano y de la misma manera mitigar el impacto ambiental. La digestión anaerobia puede llevarse a cabo tanto en rangos de temperatura mesofílicos o termofílicos. En temperaturas termofílicas las tasas de degradación y gasificación son más rápidas y tiene mayor potencial de destruir maleza así como plantas patógenas lo cual es especialmente benéfico para el residuo que no se digirió con un breve post tratamiento y así poder regresar sus nutrientes a las tierras de cultivo. (Koppar y Pullammanappallil, 2013).

Siles et al., (2010) realizaron digestión anaerobia de residuos cítricos de cáscara de naranja en un reactor CSRT semicontinuo a 55°C. El sustrato fue pretratado

mediante destilación con vapor por 1 hora para minimizar el contenido de limoneno, llegando a remover un 90% del mismo. La carga orgánica utilizada para la experimentación fue variando de 1.20 a 3.67 Kg de DQO/ m<sup>3</sup> día alcanzando remociones de DQO del 90%. También reporta que la máxima carga orgánica tolerada es de 4 Kg de DQO, esto para no acidificar el reactor.

(Koppar y Pullammanappallil, 2013) operaron un digestor anaerobio en un régimen termofílico (55°C) usando como sustrato el residuo proveniente de la cáscara de naranja y de las aguas residuales de la industria cítrica. El tiempo de retención dentro del digestor fue de 25 días y el reactor se operó por 76 días. En promedio la carga orgánica fue de 0.5 kg DQO/ m<sup>3</sup> d. No se reportó toxicidad debido a la presencia de limoneno. La biogásificación alcanzo los 0.116 m<sup>3</sup> de metano por kilogramo de cáscara de naranja y para el caso de las aguas residuales fue de 2.1 m<sup>3</sup> de metano por metro cubico de agua residual. Concluyeron que tanto la cáscara de naranja como las aguas residuales cítricas son una fuente de energía y ofrece un balance positivo tanto económico como energético.

## **1.6 La fluidización**

El termino fluidización es usualmente asociado con un sistema de dos o tres fases, en el cual las partículas sólidas son fluidizadas por una corriente de un líquido o gas fluyendo en sentido contrario a la gravedad. En el caso de los sistemas de clásicos de fluidización las partículas sólidas tienen una mayor densidad que la del fluido, en la fluidización inversa la densidad especifica del líquido es mayor que la densidad especifica de la partícula y el lecho es expandido hacia abajo en dirección del fluido. (García - Calderón et al., 1998)

El principio de fluidización es poner en suspensión un material granular por una corriente de fluido. Este material se comporta en reposo como un medio poroso. La suspensión tiene lugar cuando la fuerza de gravedad de la partícula solida es compensada por la fuerza generada del fluido. Cuando se pone en suspensión,

las partículas del lecho tienen un comportamiento parecido al del fluido, como son la densidad y viscosidad.

### **1.6.1 El fenómeno de la fluidización**

La manera de retener a los microorganismos dentro del reactor consiste en inmovilizarlos sobre las partículas de un material más pesado que el líquido y después mantenerlos en suspensión utilizando el propio líquido. La suspensión se consigue cuando el arrastre friccional ejercido por el fluido es equivalente a la gravedad. El principio de la fluidización consiste en poner en suspensión un material granular por un flujo líquido, este material se comporta en reposo como un medio poroso. En la fluidización clásica, el soporte se pone en suspensión cuando la fuerza de gravedad de la partícula sólida es compensada por la fuerza debida al flujo del líquido. En la fluidización inversa esta fuerza y la fuerza de gravedad deben compensar la fuerza de Arquímedes. Cuando está suspendida la capa de partículas tiene un comportamiento cercano al de un fluido, porque la capa posee la misma densidad y viscosidad que el fluido pero guarda las propiedades de un sólido dividido. (Levin y Gealt, 1997)

### **1.6.2 La semifluidización**

Un lecho semifluidizado se forma restringiendo la expansión de un lecho fluidizado por medio de una malla o placa perforada que se encuentra en la parte superior del lecho (ver Figura 1.4). De esta manera en la parte superior del lecho, se forma un lecho fijo con la partículas cuya expansión está siendo restringida y en la parte inferior se tiene un lecho fluidizado con las partículas que si pueden expandirse. Es decir que un lecho semifluidizado tradicional está compuesto de un lecho fijo en la parte superior y un lecho fluidizado en la parte inferior (Leyva et al., 1993), cabe destacar que en los sistemas de fluidización inversa esto puede cambiar.

El fenómeno de la semifluidización ha sido poco estudiado, solo se encuentra el estudio hidrodinámico por parte de Leyva et al., en 1993. Pero no existe ninguna investigación sobre este fenómeno aplicado a algún proceso biológico.

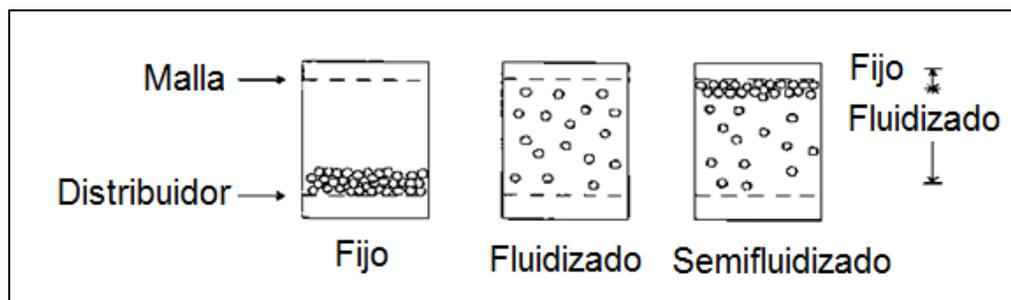


Figura 1.4 Diferencia entre los lechos fluidizados (Leyva et al., 1993)

En un lecho semifluidizado se combinan las ventajas y desventajas de ambos sistemas y tiene bastantes aplicaciones potenciales. El lecho semifluidizado se ha utilizado como una combinación de dos tipos de reactores ya que las partículas de la sección fluidizada se comportan como en un reactor de tanque agitado y las de la sección empacada como en un reactor tubular flujo tapón. La caída de presión en un lecho semifluidizado es igual a la suma de la caída de presión de la sección fluidizada y de la sección empacada. La caída de presión en un lecho fluidizado permanece constante con el aumento de la velocidad pero en un lecho semifluidizado la caída de presión aumenta con la velocidad. (Leyva et al., 1993).

### 1.6.3 La biopelícula en la fluidización

El proceso natural de acumulación de biomasa puede provocar importantes cambios en los lechos fluidizados inversos, el crecimiento de biopelícula en la superficie de las partículas modifica sus características incrementando su diámetro y modificando su densidad específica, lo que resulta en una expansión mayor a la misma velocidad de fluidización, este fenómeno debe ser considerado para poder controlar la expansión del lecho en la procesos de digestión anaerobia.

La densidad de la biopelícula depende mucho del tipo de soporte y de la velocidad de fluidización. Una de las características importantes de los lechos fluidizados en procesos biológicos es que el tamaño de las partículas no es uniforme debido a las diferencias en el tamaño de la biopelículas. Eso implica a menudo un fenómeno de estratificación, es decir la selección axial del tamaño de las partículas. En el caso de la fluidización inversa las partículas más colonizadas al tener una densidad mayor tienden a decantarse y a situarse en la parte inferior del lecho.

#### **1.6.4 Reactores de lecho fluidizado inverso (RLFI)**

Comparados con los reactores de lecho fluidizado, los Reactores de Lecho Fluidizado Inverso (RLFI) ofrecen varias ventajas operativas tales como un flujo gas – sólido uniforme con mucho menor agregado de sólidos, menor dispersión axial y periodos de residencias más cortos. Los RLF son reactores trifásicos gas – líquido - sólido, formados por un lecho de partículas de pequeño tamaño sobre las que se mantiene adherida la biomasa y a través del cual circula un fluido con una velocidad lo suficientemente elevada como para provocar la fluidización del lecho. (García - Calderón et al., 1998)

Los reactores de lecho fluidizado inverso utilizan partículas de soporte con una densidad específica más baja que la del líquido, estas partículas son fluidizadas hacia abajo. La fluidización inversa ha recibido mucha menor atención que la fluidización normal, ya que la mayoría de estudios científicos que se han llevado a cabo sobre este tema son orientados solo a la parte hidrodinámica. (Zhang et al., 1999)

Los RLFI utilizan pequeñas partículas fluidizadas para inducir la inmovilización y crecimientos de las bacterias, las cuales son las responsables de la degradación de materia orgánica. La tecnología de lechos fluidizados ha sido exitosamente aplicada las últimas décadas al tratamiento de aguas residuales tanto aeróbico como anaeróbico, en el caso de la digestión anaeróbica la tecnología de lechos

fluidizados permite mayor transferencia de masa y desarrollo de biopelícula lo cual resulta en la posibilidad de poder trabajar con mayores cargas orgánicas y menores tiempos de retención que las tecnologías tradicionales. (García - Calderón et al., 1998)

### **1.6.5 Ventajas de los RLFI**

Los RLFI ofrecen grandes ventajas tales como tiempos de retención menores a 12 horas y gran capacidad de carga. En estos reactores no existen problemas de taponamiento porque el volumen del soporte fluidizado se adapta al crecimiento de la biopelícula. La ventaja principal proviene de la movilidad de las partículas, lo que permite un mezclado en el reactor y la obtención de un área importante para la adhesión y crecimiento de la biomasa. La inmovilización de la biomasa en estas condiciones permite minimizar uno de los mayores inconvenientes de la digestión anaerobia el cual es el elevado tiempo de generación de microorganismos, a su vez permite trabajar con cargas orgánicas muy elevadas (incluso mayores a 100 kgDQO/m<sup>3</sup>\*d). Además este tipo de reactores soportan bastante bien los cambios repentinos de pH y carga, lo cual es una gran ventaja en los procesos biológicos. (Hidalgo y García., 2012)

### **1.6.6 Aplicación de los RLFI**

La digestión anaerobia de residuos orgánicos se ha llevado a cabo en diferentes tipos de reactores cada uno ofrece diferentes ventajas y desventajas particulares, de entre ellos podemos destacar a los reactores de lecho fluidizado y a su variante, los reactores de lecho fluidizado inverso.

Alvarado-Lassman et al., (2008) implementaron reactores anaerobios de lecho fluidizado inverso para evaluar la remoción de carga orgánica proveniente de aguas residuales de la industria cervecera, aplicando diferentes cargas orgánicas. Utilizaron 2 diferentes soportes para el reactor: extensphere y polietileno de baja densidad y forma irregular. Se alcanzaron porcentajes de remoción de DQO

mayores al 90%. El reactor con soporte de polietileno mostro una excelente remoción de DQO con cargas orgánicas mayores a 10 gDQO/L\*día. El reactor con soporte de extensphere mostro un excelente comportamiento biológico e hidrodinámico trabajando con cargas orgánicas mayores a 70 gDQO/L\*día. Concluyeron que la operación en estado estable para este tipo de reactores, se alcanza con una carga orgánica de 30 gDQO/L\*día mostrando una buenas características hidrodinámicas. A su vez sugiere utilizar el soporte de polietileno para cargas orgánicas menores a 10g DQO/L\*día y el extensphere para cargas orgánicas mayores.

Sowmeyan y Swaminathan, (2008) utilizaron un reactor de lecho fluidizado inverso para realizar la digestión anaerobia de efluentes de destilería. El material de soporte fueron partículas de perlita debido a que presenta una superficie específica de  $7 \text{ m}^2/\text{g}$  y por sus bajas demandas energéticas para llevar a cabo la fluidización. Una vez que el sistema alcanzó el estado estable, la carga orgánica fue incrementada gradualmente reduciendo los tiempos de retención hidráulica de 2 a 0.19 días, manteniendo constante la alimentación de DQO. El sistema alcanzo tasas de remoción de DQO del 84% con cargas orgánicas de  $35 \text{ kg COD}/\text{m}^3 \text{ d}$ . Concluyeron que este tipo de reactores es una buena opción para llevar a cabo la digestión anaerobia de residuos orgánicos ya que alcanzan porcentajes de remoción de DQO de alrededor de 84% con tiempos de retención hidráulica menores a 0.19 días, además de presentar buen ajuste ante los cambios repentinos de carga orgánica. El material de soporte juega un papel fundamental en este proceso, la perlita utilizada en este experimento demostró ser una buena opción.

García - Calderón et al., (1998) aplicaron la fluidización inversa para llevar a cabo la digestión anaerobia de efluentes provenientes de la industria del vino rojo. Utilizaron como material de soporte la perlita la cual es una roca volcánica que a través de un análisis demostró tener una densidad específica de  $280 \text{ kg}/\text{m}^3$  y velocidades mínimas de fluidización de 2.3 m/hr. Una vez que el sistema alcanzo

el estado estable la carga orgánica fue gradualmente incrementada y los tiempos de retención hidráulica disminuyeron de 3.3 a 1.3 días, manteniendo la concentración de carbono orgánico total constante. El sistema alcanzó tasas de remoción de COT del 85% con cargas orgánicas de 4.5 kg COT/m<sup>3</sup> d. Se encuentra que las mayores ventajas de este sistema son su bajo consumo energético debido a las velocidades mínimas de fluidización necesarias y su buena tasa de remoción de contaminantes. Las tasas de remoción alcanzadas son similares a los sistemas normales de fluidización hacia arriba.

Buffiere et al., (2000) a través de un sistema de fluidización inversa en régimen turbulento trataron residuos provenientes de la industria del vino, usando como soporte partículas de extensphere obtuvieron resultados prometedores alcanzando tasas de remoción de carbono del 75 – 85% con una carga orgánica de 15 kg DQO/m<sup>3</sup> día, después de operar el reactor por 90 días. La cantidad de biomasa en términos de sólidos volátiles fue de 0.2 g/g de sólido. El rendimiento observado durante el arranque fue similar o incluso mayor, comparado con otras tecnologías de fluidización tratando el mismo residuo. La fluidización inversa turbulenta probó tener diferentes ventajas comparada con los digestores tradicionales, como el mejor control del largo de la cama de fluidización debido a la localización de la entrada del gas, a su vez el fondo del reactor puede ser usado para recuperar el lodo que se pueda formar teniendo así pocos problemas de atasco u obstrucciones.

Alvarado-Lassman et al., (2010) analizaron diversas estrategias de arranque de reactores anaerobios de lecho fluidizado inverso, para poder definir nuevas estrategias de arranque en los mismos. Para ello utilizaron 2 reactores con características similares para comparar los tiempos de arranque en modo continuo y en modo batch. Los reactores fueron inoculados con una pequeña cantidad de partículas colonizadas por un periodo de 3 meses para establecer la estrategia óptima de arranque, usaron glucosa como sustrato. Después de la fase de arranque, los reactores en modo continuo y batch removieron más del 80 % de

DQO en el día 60 de operación. Ambos reactores desarrollaron un buen soporte de colonización, pero únicamente el de modo continuo alcanzó los rendimientos teóricos de metano. Proponen una estrategia combinada de arranque y demuestra las ventajas de usar un soporte pre-colonizado

## **CAPÍTULO 2**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

## CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

En la Figura 2.1 se muestra un diagrama de bloques de la metodología que se empleó en el desarrollo de esta tesis

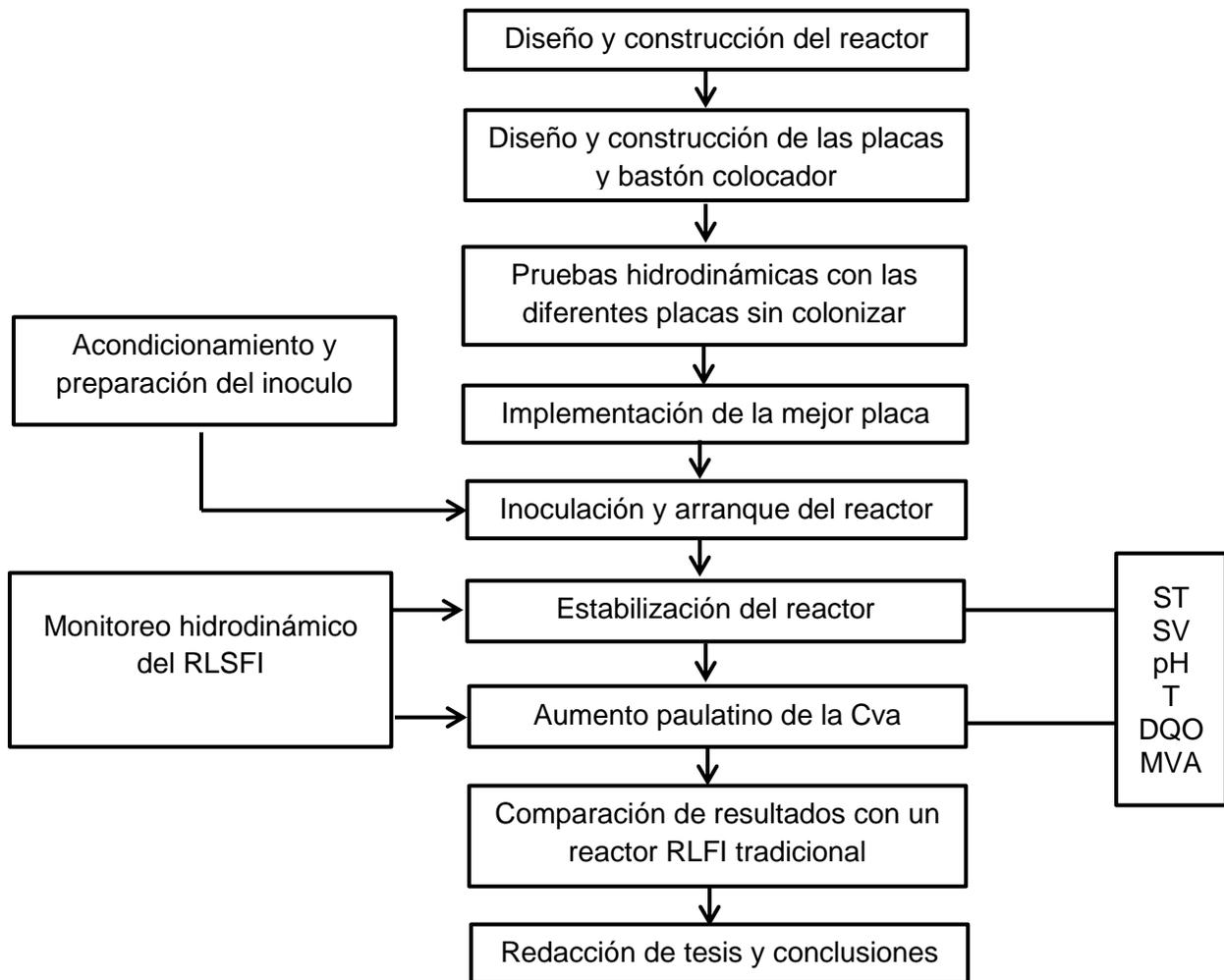


Figura 2.1 Metodología utilizada para el desarrollo de esta tesis

### **2.1 Diseño y construcción del RLSFI**

El Reactor de Lecho Semifluidizado Inverso (RLSFI) constó de un tubo de acrílico de 97 cm de alto, con un diámetro de 7 cm, espesor de 3 mm y un volumen de 3.7 L. En la parte inferior y superior se incorporaron 2 tapas maquinadas de Nylamid. La tapa superior tuvo 2 válvulas una para la salida de biogás y otra para la alimentación al reactor, ambas conexiones fueron válvulas de conexión rápida. La tapa inferior igualmente tuvo 2 aperturas una para la salida del efluente y otra para la recirculación, ambas válvulas con las mismas características antes descritas. Cabe resaltar que todas las piezas y válvulas fueron totalmente desmontables en el reactor para facilitar la limpieza del mismo.

Anexo al reactor se instaló un depósito en donde se almacenó el sustrato que se alimentó y bombeó al interior del mismo, en la parte superior se montó un aditamento para medir la producción de biogás a través de desplazamiento de líquido en un recipiente de plástico previamente graduado.

Todo lo anterior se montó en un soporte de metal con base rectangular y 2 soportes horizontales soldados al mismo, en los cuales se apoyó el reactor gracias a 2 bases de plástico para tubo PVC que se tensaron por tuercas, de esta forma se logró sustentar firmemente el tubo de manera vertical sin riesgo de caída o desplazamiento.

### **2.2 Diseño y construcción de las placas y bastón colocador**

Se diseñaron 3 placas perforadas de diferentes geometrías (orificios rectangulares y circulares), se construyeron a partir de plástico en un impresora 3D PLA, a su vez se diseñaron las herramientas adecuadas para poder montar las placas y sujetarlas dentro del reactor. Dichas herramientas constaron de un bastón colocador de plástico y un desarmador con extensión para sujetar las tuercas de las placas.

### 2.3 Acondicionamiento y preparación del inóculo

El inóculo que se utilizó para el arranque del RLSFI fue Extendsphere colonizado proveniente del RLF1 operado en la Planta Piloto del Instituto Tecnológico de Orizaba. El soporte colonizado que se extrajo era alimentado a partir de Residuos Sólidos Orgánicos Municipales (RSOM) los cuales constaban en su mayoría de residuos de frutas y verduras con elevada carga orgánica y pH neutro. Antes de extraer el inóculo se alimentó y recirculó el reactor de manera constante por un periodo de un mes, esto para aumentar el desarrollo microbiano y la biopelícula en el soporte.



Figura 2.2 Soporte colonizado extraído del RLF1

### 2.4 Pruebas hidrodinámicas de soporte dentro del RLSFI

Se realizaron diferentes pruebas hidrodinámicas de expansión de lecho, dichas pruebas se llevaron a cabo usando Extendsphere como medio de soporte. Se fluidizó con soporte limpio, soporte colonizado en presencia de biogás y sin biogás.

#### 2.4.1 Expansión con soporte limpio

Antes de llevar a cabo esta prueba, se procedió a limpiar el Extendsphere de toda partícula ajena al soporte, para ello se lavó varias veces dentro del mismo RLSFI con agua corriente y se retiró el precipitado de tierra y partículas extrañas.

Para la realización de la prueba hidrodinámica se introdujo al reactor 750 cm<sup>3</sup> de Extendsphere limpio, equivalente a 25% del volumen útil. Dentro del reactor se encontraba ya montado el lecho fijo, la placa difusora y la placa de semifluidizado a probar (también se probó sin placa).



Figura 2.3 Extendsphere limpio dentro del RLSFI antes de iniciar la expansión

Una vez que el lecho alcanzó su mayor compactación aproximadamente después de 0.5 h de reposo, se hizo pasar un flujo a diferentes velocidades través del mismo, de menor a mayor. Con cada variación de velocidad en el flujo se dejó que el lecho se expandiera por 20 minutos para tomar la variación de altura. En la Figura 2.4 se aprecia el lecho expandido.



Figura 2.4 Extendsphere totalmente expandido dentro del RLSFI

#### **2.4.2 Expansión con soporte colonizado sin biogás**

Se utilizó soporte colonizado extraído del RLFI de Planta Piloto, dicho soporte se le practico determinación de Materia Volátil Adherida (MVA) a su vez se observó al microscopio óptico con 40 X de aumento para conocer el grado de colonización del mismo.

Para la realización de la determinación de expansión, se montó la placa de semifluidizado de orificio de 6 mm al 80% de expansión del lecho total. A su vez se introdujeron 1150 mL de soporte colonizado y se siguió la misma mecánica que con el soporte limpio, haciendo pasar un flujo de agua a diferentes velocidades y determinando el cambio de altura en el lecho.

#### **2.4.3 Expansión con soporte colonizado con biogás**

Para esta determinación se alimentó el RLSFI por un periodo de una semana con una Cva de 8 gDQO/L\*día, con sustrato pre-hidrolizado de RSU proveniente de un reactor de hidrólisis ubicado en Planta Piloto de Instituto Tecnológico de Orizaba. Al momento de realizar la expansión, el reactor tenía una tasa aproximada de producción de biogás de 8 L/d equivalente a una velocidad de biogás de 0.09 m/h. Se utilizaron las mismas condiciones que en la determinación sin biogás, con la placa de semifluidizado de orificio circular de 6 mm, montada a un 80% de expansión.

#### **2.5 Inoculación y arranque del reactor**

Se extrajeron 1150 mL de soporte colonizado del RLFI de Planta Piloto del Instituto Tecnológico de Orizaba, los cuales fueron vaciados dentro de la columna del reactor. Se inició la alimentación del RLSFI con un sustrato pre-hidrolizado de residuos de frutas y verduras provenientes del reactor de hidrólisis ubicado en Planta Piloto, por un periodo de 30 días con una Cva de 3 gDQO/L\*día y pH neutro.

## 2.6 Preparación del sustrato cítrico

El sustrato cítrico utilizado para la alimentación del RLSFI se preparó a partir de cáscara de naranja Valencia (*Citrus Sinesis*) recolectada de locales circundantes a la institución. La cáscara de naranja una vez recolectada se limpió con agua de la llave para retirar impurezas, posteriormente paso a molienda en una licuadora de aspas, finalmente se filtró a través de una malla y un filtro de tela. El sustrato final al tener un pH ácido de aproximadamente 3, se neutralizó a pH 7 agregando bicarbonato de sodio. La mezcla resultante se almacenó en un contenedor de plástico dentro del refrigerador.

Debido a que el sustrato cítrico no ofrece todos los elementos nutricionales que necesita el consorcio bacteriano para desarrollarse y observar buenas remociones de DQO y rendimiento en el reactor (González-Paz, 2015), se adicionaron los micronutrientes que se muestran en la Tabla 2.1 en las concentraciones que Aguilar – Montor (2014) sugiere en su trabajo.



Figura 2.5 Sustrato de cascara de naranja

Tabla 2.1 Micronutrientes adicionados al sustrato cítrico

Sustancia	Concentración (mg/L)
Cloruro de Potasio	0.5
Cloruro de Cobalto	0.1
Cloruro Ferroso	0.5
Cloruro de Calcio	0.5

## 2.7 Estabilización y operación del RLSFI

Durante el periodo de arranque, estabilización y operación del RLSFI se monitorearon los parámetros que se muestran en la Tabla 2.2

Tabla 2.2 Parámetros monitoreados en la operación del RLSFI

Parámetro	Unidad
pH	
Solidos Totales	g/L
Solidos Volátiles	g/L
% de metano	%
DQO total	g/L
DQO soluble	g/L

### 2.7.1 Determinación de pH

La determinación de pH se realizó a través de un potenciómetro marca ORION Research. Inc. Model 250 A. siguiendo el método Potenciometrico 4500-H B de la Standard methods.

### 2.7.2 Determinación de sólidos totales y solidos volátiles

La determinación de sólidos totales y volátiles se realizó por el método gravimétrico según la norma NMX-AA-034-SCFI-2001, en una Mufla Furnace 1300 (Barnstead/thermolyne) para calcinación y con una estufa Riossa, modelo: H-33 para la eliminación de humedad. Los cambios en la cantidad de materia se determinaron en una balanza Analítica Adventurer Ohaus.

### 2.7.3 Determinación de porcentaje de metano

La determinación de metano se realizó en un Cromatógrafo de gases marca Buck Scientific Model 310. Dicho cromatógrafo utiliza como gas de acarreo Helio, puede identificar Oxígeno, Dióxido de Carbono, Nitrógeno y Metano. Está conectado a un

equipo de cómputo con el software del fabricante en el que muestra los resultados a través de una integración numérica de área bajo la curva.

#### **2.7.4 Determinación de Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

La Demanda Química de Oxígeno, total y soluble se llevó a cabo por el Micrométodo Colorimétrico 5220 D Standard Methods, para lo cual se utilizó una placa digestora (COD Reactor) marca Hach para suministrar el calor de reacción, una centrifuga Beckman Allegra para la centrifugación de la DQO soluble, un espectrofotómetro ODYSSEY DR2500 marca Hach para leer la transmitancia de la muestra y pipetas automáticas Eppendorf Research para realizar las determinaciones.

#### **2.7.5 Determinación de Materia Volátil Adherida (MVA)**

La determinación de MVA al soporte del reactor se realizó por gravimetría, se tomó con una jeringa de 5 mL soporte proveniente del reactor, después de que se separara el agua se determinó visualmente el volumen de soporte que contiene la alícuota, posteriormente se depositó en un sobre de aluminio a peso constante para llevarlo a la estufa a 100° C por 24 horas y al finalizar a la mufla por 2 horas a 550° C. Los resultados de arrojan la cantidad de SV adheridos al soporte, dicho resultado se reportó en g de biomasa/ mL de soporte.

### **2.8 Aumento paulatino de la carga**

Una vez que se logró la estabilización del RLSFI usando como sustrato la cascara de naranja, se procedió a ir aumentando la carga inicial de 3 gDQO/L\*d hasta llegar a una carga final de 40 gDQO/L\*d. Para ello se mantuvo el mismo flujo de alimentación diaria al RLSFI de 8 L/d, pero se aumento la concentración de DQO del influente para poder lograr el incremento de la Cva.

## **2.9 Seguimiento hidrodinámico del RLSFI en operación continua**

Durante los 190 días de operación del RLSFI se monitoreo la expansión del soporte colonizado dentro del mismo, para ello se graduó con una cinta métrica el RLSFI y se observó el aumento en cm del lecho en su operación diaria. A su vez se monitoreo constantemente tanto la velocidad descensional del líquido dentro del reactor así como la velocidad de biogás. Esto se logró a través de la medición del caudal diario de ambos flujos y el conocimiento del diámetro del reactor.

## **CAPÍTULO 3**

# **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Diseño y construcción del RLSFI

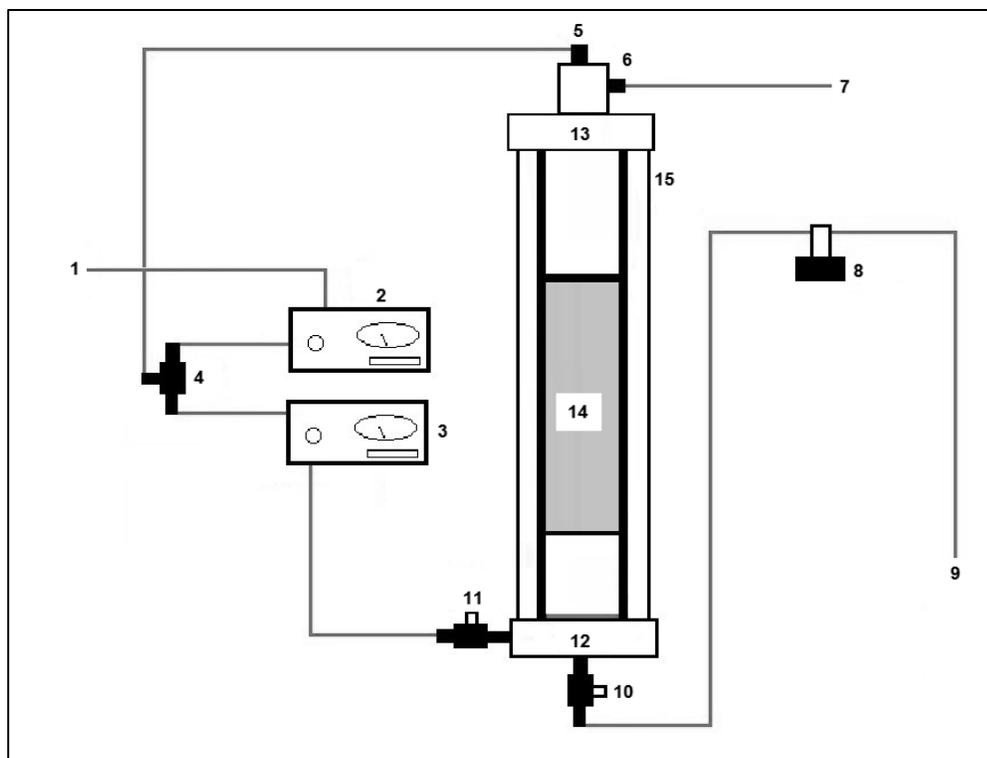
Se realizó la construcción y montaje del RLSFI, En la Figura 3.1 se puede ver un diagrama esquemático del RLSFI. Dicho reactor se construyó de acrílico con las siguientes medidas:

Tabla 3.1. Características del RLSFI

<b>Diámetro</b>	7 cm
<b>Altura total</b>	97 cm
<b>Volumen</b>	3.7 L
<b>Forma geométrica</b>	Cilindro alargado
<b>Material</b>	Acrílico
<b>Tipo</b>	Lecho Semifluidizado
<b>Cantidad de Soporte</b>	1 L
<b>Tipo de soporte</b>	Extendosphere previamente colonizado

Las mangueras con las que se conectó todo el sistema del reactor son mangueras neumáticas de ¼ de pulgada marca Parker al igual que las válvulas. Las tapas tanto superior como inferior del RLSFI fueron de Nylamid con 3 perforaciones en donde a traviesan espárragos de metal que se aprietan con tuercas.

Para la operación del reactor se utilizaron 2 bombas peristálticas de velocidad variable (Masterflex Cole-Parmer<sup>TM</sup>), una para la alimentación del influente y otra para la recirculación, ambas bombas exhiben el mismo comportamiento de flujo a las mismas velocidades. Cada 15 días se desarmo totalmente el RLSFI para lavar todo el sistema de mangueras y eliminar la biomasa acumulada en ellas ya que esta obstruye el sistema de salida y de alimentación.



Número	Significado
1	Tanque de almacenamiento de sustrato
2	Bomba de alimentación
3	Bomba de recirculación
4	Conector Y
5	Conexión de alimentación
6	Conexión de biogás
7	Tanque de almacenamiento de biogás
8	Nivel del reactor
9	Tanque de almacenamiento de efluente
10	Válvula de salida de efluente
11	Válvula de recirculación
12	Tapa inferior de nylamid
13	Tapa superior de nylamid
14	Lecho semifluidizado del reactor
15	Espárragos de sujeción

Figura 3.1 Diagrama esquemático del RLSFI

### 3.1.1 Características internas del RLSFI

Dentro del RLSFI se dividieron zonas específicas de acuerdo a la función que tuvo cada una, como se observa en la Figura 3.2

1. Cámara de biogás (7 cm)
2. Lecho fijo (6 cm)
3. Espacio de seguridad (4 cm)
4. Soporte (65 cm)
5. Agua residual (15 cm)

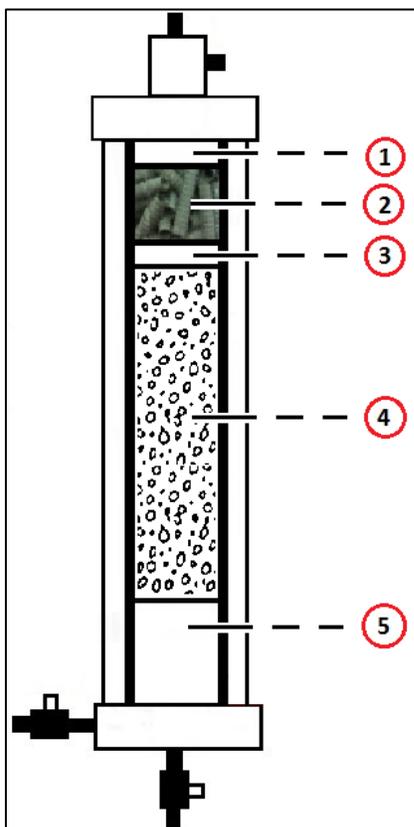


Figura 3.2 Diferentes zonas dentro del RLSFI

### 3.1.2 Características del lecho fijo

El lecho fijo constó de 100 tubos de polietileno (popote corrugado) tratados con esmalte acrílico color gris, esto para favorecer el desarrollo y adherencia microbiana en el mismo. El lecho fijo sirvió tanto para difundir el flujo de manera uniforme a través del reactor así como material de soporte para que se reproduzcan bacterias que degraden la materia orgánica presente en el sustrato a tratar.

<b>Diámetro</b>	5 mm
<b>Largo promedio</b>	3 cm
<b>Peso promedio</b>	0.20 g

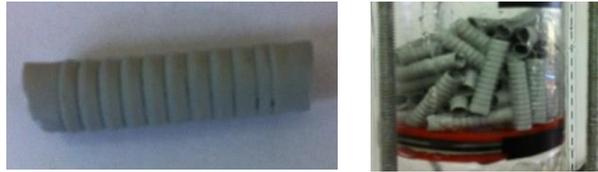


Figura 3.3 Características del lecho fijo del RLSFI

### 3.1.3 Características del difusor

La placa difusora se ajustó al tubo gracias a un empaque de hule colocado entre las 2 piezas del difusor. La placa cumplió dos objetivos: uno fue el diseminar el flujo para que no cayera en una sola dirección de este modo se evitó la descolonización por golpeteo y el otro fue dar soporte al lecho fijo. El diseño del difusor se muestra en la Figura 3.4

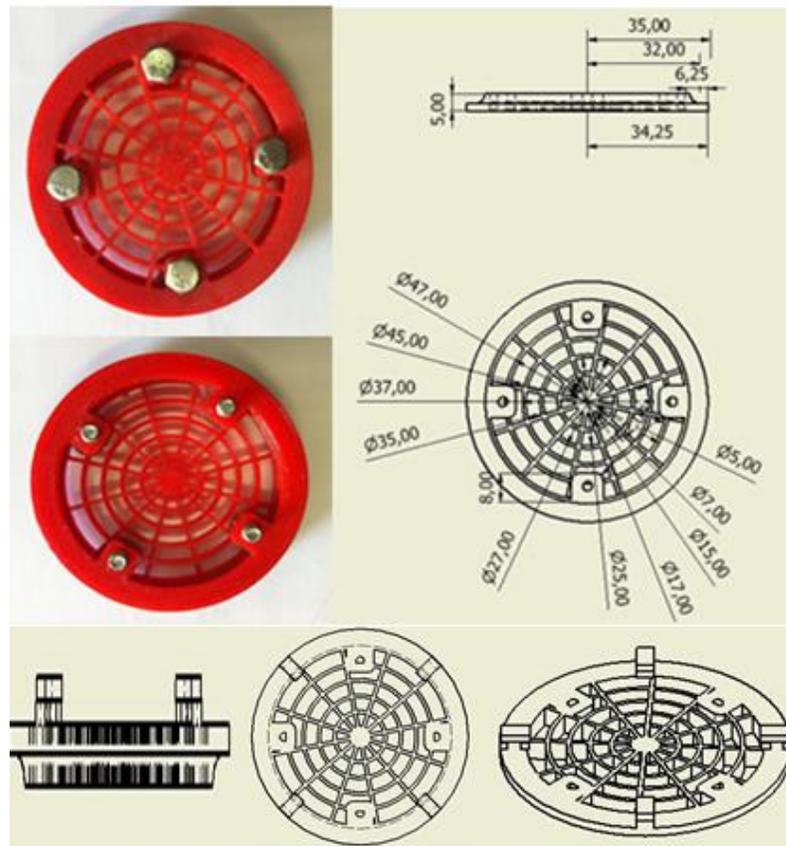


Figura 3.4 Diseño del difusor del RLSFI

### 3.2 Diseño y construcción de las placas

Se diseñaron 3 tipos de placas para lograr la semifluidización dentro del RLSFI, dichas placas fueron fabricadas de plástico junto con los anillos de sujeción los cuales fueron contruidos de acrílico, todo fue diseñado y construido en una impresora 3D PLA.

#### 3.2.1 Placa de rejilla 1 mm

Esta placa de rejilla se diseñó de plástico con orificios rectangulares transversales menores a 1 mm, dicha placa se montó en los anillos de sujeción. En la Figura 3.5 se observan los diagramas de la misma. El diámetro de la placa fue de 7 cm con 4 perforaciones para los tornillos que dan el soporte al anillo de sujeción.

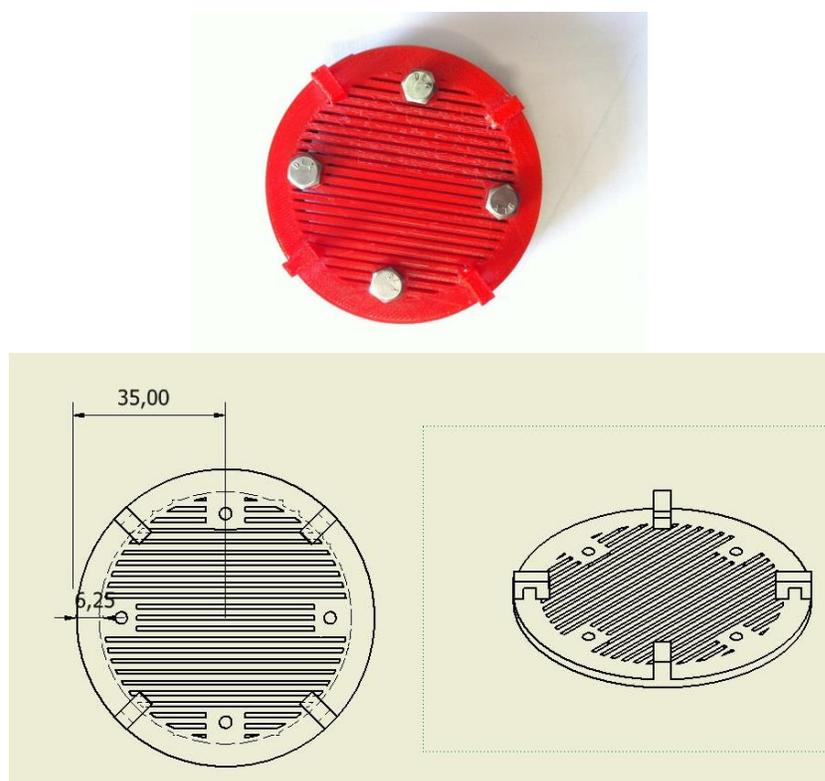


Figura 3.5 Diagrama de placa de rejilla diseñada para el RLSFI

### 3.2.2 Placa de orificio de 2.5 mm

Esta placa de orificio grande se diseñó de plástico con orificios circulares con un diámetro de 2.5 mm, dicha placa se montó en los anillos de sujeción. En la figura 3.6 se observan los diagramas de la misma. El diámetro de la placa es de 7 cm con 4 perforaciones para los tornillos que dan el soporte al anillo de sujeción.

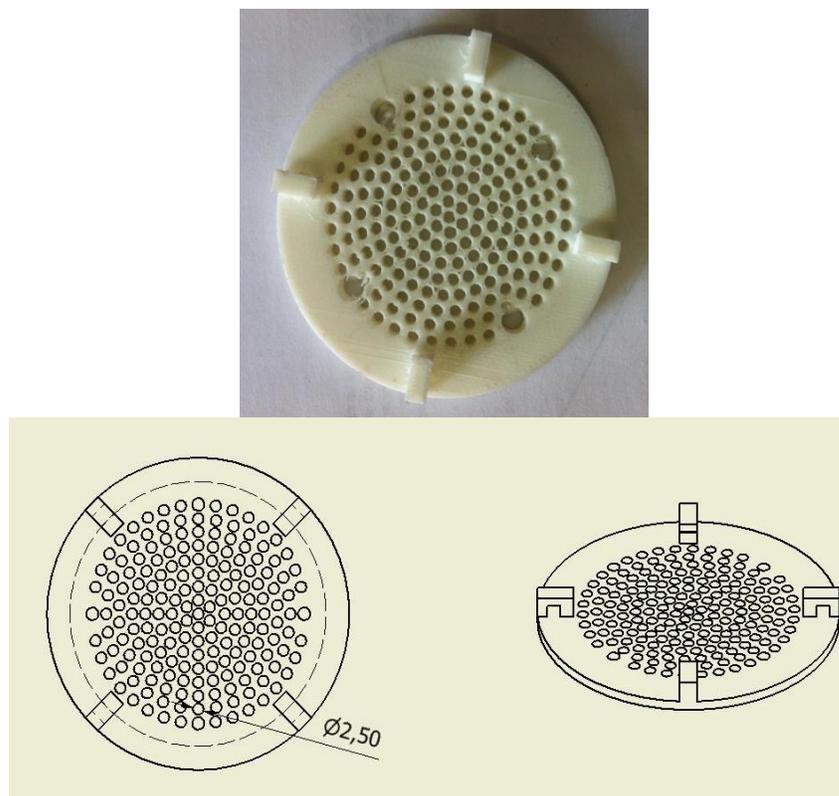


Figura 3.6 Diagrama de placa de poro grande diseñada para el RLSFI

### 3.2.3 Placa de orificio de 1 mm

Esta placa de orificio circular se diseñó de plástico con orificios circulares con un diámetro de 1 mm, dicha placa se montó en los anillos de sujeción. En la figura 3.7 se observan los diagramas de la misma. El diámetro de la placa es de 7 cm con 4 perforaciones para los tornillos que dan el soporte al anillo de sujeción.

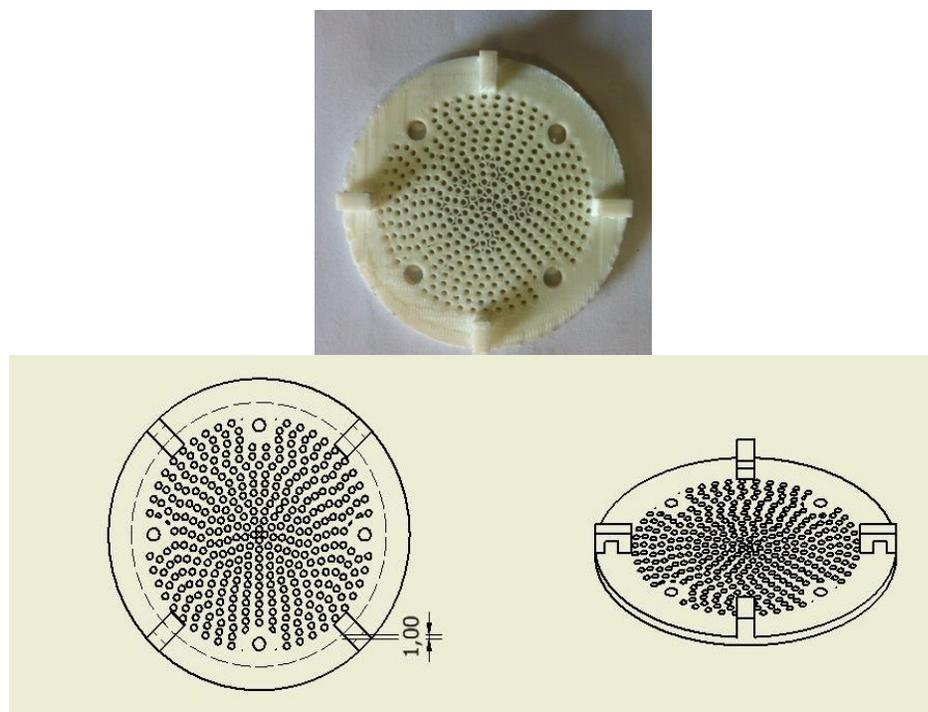


Figura 3.7 Diagrama de poro pequeño diseñada para el RLSFI

### 3.2.3 Placa modificada orificio 6 mm

Debido a problemas de taponamiento con materia orgánica desprendida, de lo cual se ahondara en el apartado 3.3.2, fue necesario hacer una ampliación de tamaño de poro a la placa de orificio de 2.5 mm, agrandando los orificios hasta 6 mm. El material y las demás características se conservaron iguales a las anteriores placas descritas.

### 3.2.4 Diseño de los bastones colocadores

Las placas diseñadas se situaron en la parte baja del RLSFI por lo que se construyeron 2 bastones de colocación especiales, uno para poder situarlo en la posición requerida y otro para ya sea apretar o aflojar los tornillos del arillo de presión.

El bastón de sujeción tuvo una placa que se fija a las rejillas para que se pueda montar y desmontar al bastón, bastó con girar suavemente a la izquierda para montar y a la derecha para desmontar.

El bastón de sujeción tuvo la característica de poder mover la rejilla entre posición vertical-horizontal y viceversa, esto con el fin de que el soporte pudiera pasar por los lados y este no se compacte en el fondo cuando se introdujo la rejilla y existía soporte dentro del RLSFI, tal como se aprecia en la Figura 3.8.

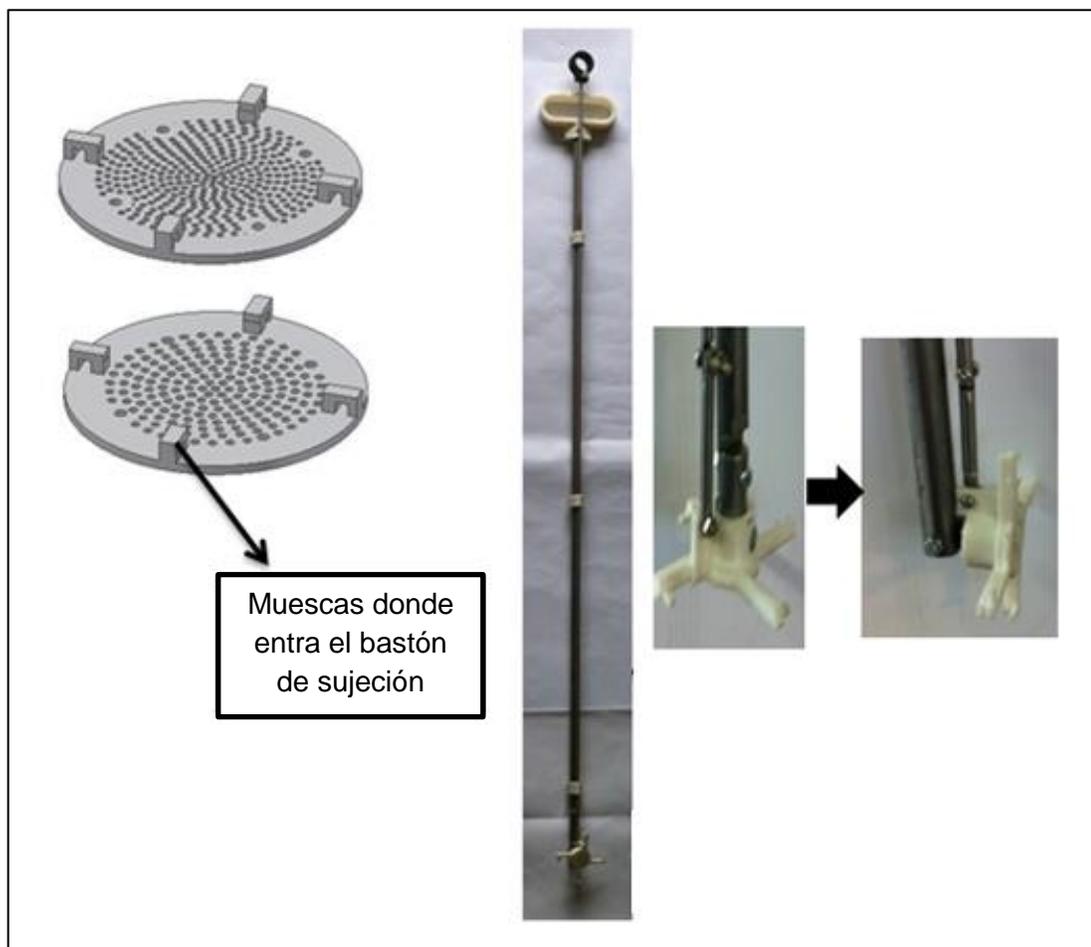


Figura 3.8 Descripción y uso del bastón de sujeción

Aparte del bastón de sujeción, se diseñó y construyó una herramienta especial que permitió apretar o aflojar los tornillos de los arillos a presión, sin necesidad de ingresar un desarmador. Esta fue un tubo de acero que trajo consigo en la punta inferior soldado un dado correspondiente al cabezal del tornillo de la rejilla, como se muestra en la Figura 3.9. A su vez fue útil para remover materia orgánica que se depositó en la placa de semifluidizado en la operación en continuo.

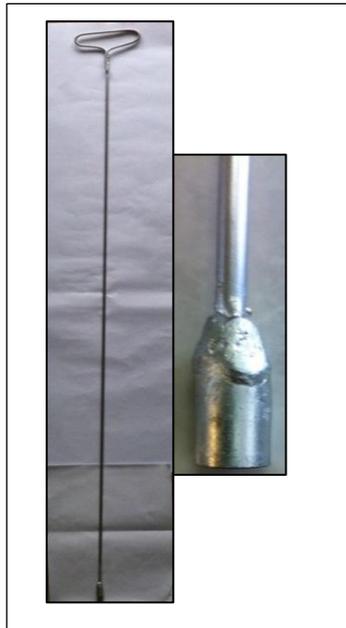


Figura 3.9 Herramienta diseñada para apretar los cabezales

Con las herramientas diseñadas se logró colocar las placas dentro del RLSFI tal como se ve en la Figura 3.10

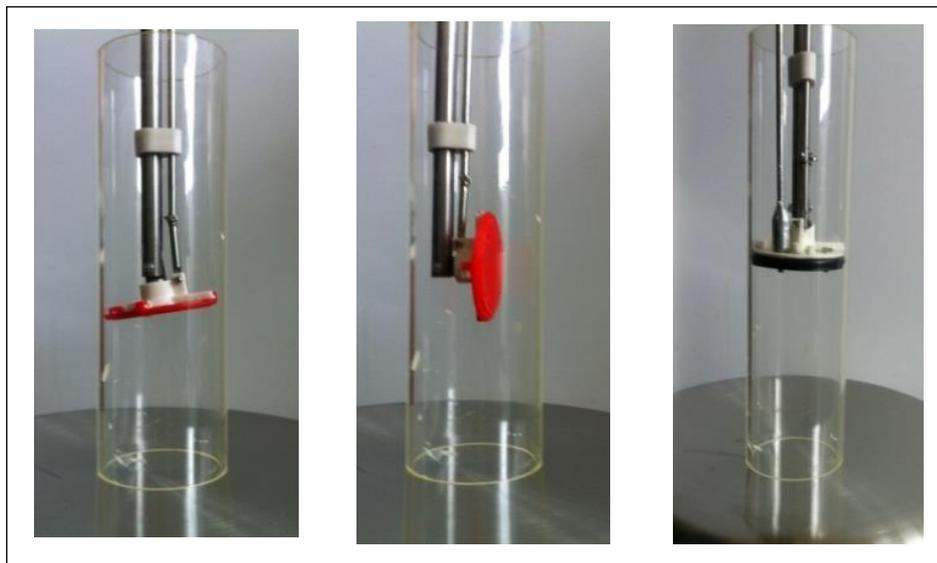


Figura 3.10 Colocación de las placas dentro del RLSFI

### 3.3 Pruebas hidrodinámicas de expansión

Se llevaron a cabo pruebas hidrodinámicas de expansión del lecho fluidizado tanto sin placa, como con las diferentes placas de semifluidizado, a su vez con soporte limpio y colonizado, en presencia y ausencia de biogás. Esto para poder seleccionar la mejor placa de semifluidizado a utilizar en el arranque y operación continua del RLSFI.

#### 3.3.1 Pruebas hidrodinámicas con soporte limpio

Se llevaron a cabo pruebas de expansión de lecho fluidizado dentro del RLSFI con soporte limpio, montando las 3 diferentes placas diseñadas y con el lecho fluidizado libre sin presencia de placas. En la Figura 3.11 se observan los resultados obtenidos.

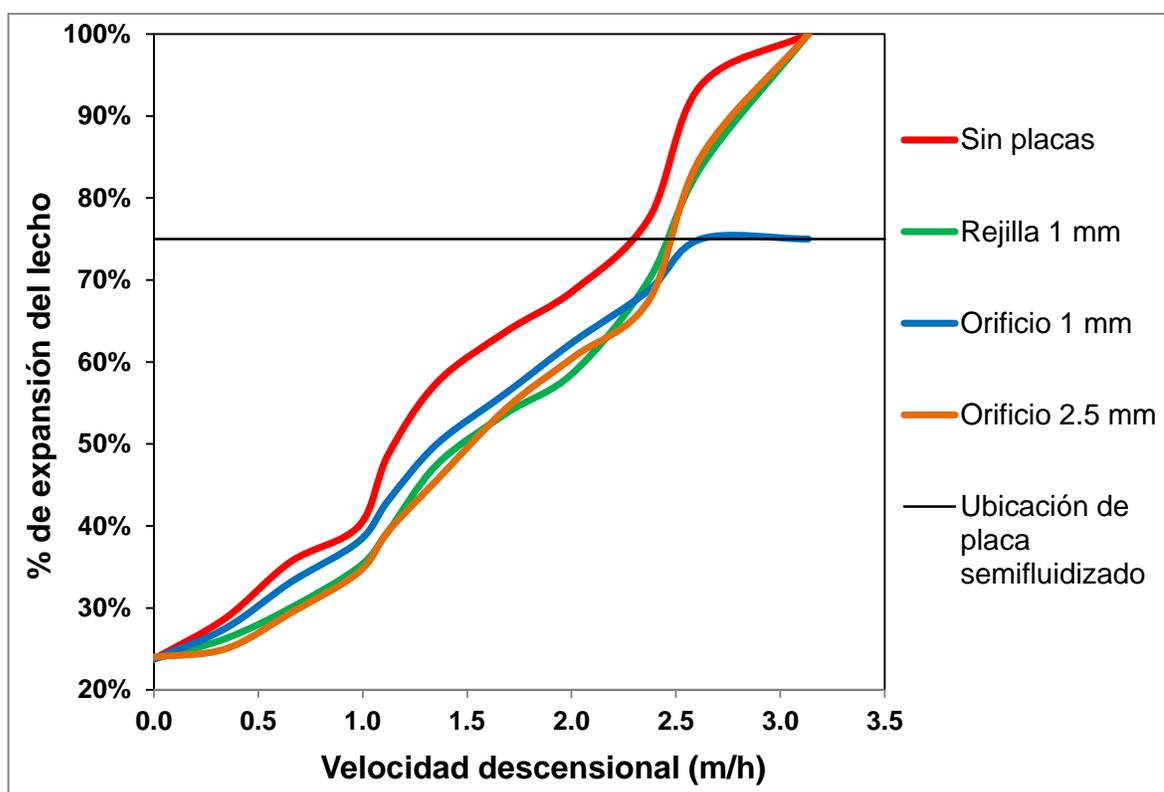


Figura 3.11 Resultados de pruebas de fluidización con soporte limpio y diferentes placas

El uso de las herramientas previamente diseñadas y descritas con anterioridad para colocar las placas de semifluidizado dentro del soporte, mostró ser de gran utilidad ya que se pudieron colocar y retirar de manera rápida y sin necesidad de vaciar el RLSFI.

Se puede observar que el porcentaje de expansión del lecho fluidizado sin presencia de ninguna placa es mayor que en los demás casos, esto resulta lógico ya que no existe ninguna barrera física que restrinja el flujo dentro del lecho.

La placa de orificio de 1 mm fue la única que logró retener el soporte dentro de la zona del lecho fluidizado como se muestra en la Figura 3.12, aun cuando se aumentó la velocidad descensional hasta 3 m/h. Esto resulto favorable ya que se formó un lecho semifluidizado y el flujo dentro del reactor permaneció constante sin taponamientos. Tanto la placa de rejilla como la de poro grande, lograron disminuir la expansión aun cuando dejaron pasar el soporte a través de las mismas, se observó que estas placas restringen el flujo parcialmente pero no lograron retener del todo, el soporte en la zona de fluidización por lo que este empezó a abandonar el RLSFI.



Figura 3.12 Soporte limpio retenido por la placa de orificio de 1 mm

Alvarado – Lassman et al., (2008) realizaron diversas pruebas hidrodinámicas usando como material de soporte Extendsphere y polietileno, sugirieron utilizar un 25% del volumen útil del reactor para soporte y velocidades menores a 6 m/h

para fluidizarlo. Demostraron que el Extendsphere da buenos resultados debido a su tamaño y propiedades físicas. También determinaron que la velocidad de líquido es un factor preponderante en la expansión de los lechos fluidizados aun por encima del porcentaje de soporte dentro del reactor. Como se puede ver en este trabajo, al utilizar velocidades de líquido mayores a 3 m/h el soporte abandono el reactor salvo al usar la placa de orificio de 1 mm, lo cual comprueba la importancia de la velocidad descensional del flujo para controlar la expansión del soporte dentro del reactor.

### 3.3.2 Pruebas hidrodinámicas con soporte colonizado

Debido a los resultados que mostraron las pruebas hidrodinámicas practicadas con soporte limpio, se montó el RLSFI con la placa de orificio de 1 mm. El análisis de MVA practicado al inóculo colonizado mostro una cantidad de 0.014 g de biomasa / mL de soporte.

Se llevó a cabo la determinación de expansión del lecho fluidizado ahora con soporte colonizado. Después de operar el reactor por 24 horas, la placa se tapó completamente obstruyendo el flujo y haciendo inoperante el reactor. En la Figura 3.13 se observa la placa de 1 mm con los orificios tapados por biomasa.



Figura 3.13 Placa de orificio de 1 mm después de operar al RLSFI con soporte colonizado

El desprendimiento de biomasa por parte del soporte, es un proceso normal y cíclico que ocurre en la formación de la biopelícula dentro del material de soporte tal como lo menciona en su trabajo Stoodley et al., (2002). Las placas de semifluidizado deben ser capaces de poder seguir operando aun cuando el

soporte desprenda biomasa ya que de otra manera, estas no funcionarían o se obstruirían rápidamente, deteniendo el funcionamiento del reactor.

Una vez que se tapó la placa de orificio de 1 mm, se cambió a la placa de orificio grande (2.5 mm) ya que era la de mayor apertura de poro que se había diseñado. Después de un día de operación, también se obstruyó y no permitió el funcionamiento del reactor, lo mismo sucedió con la placa de rejillas. Debido a lo anterior se decidió agrandar los orificios de la placa más grande (2.5 mm) a un tamaño de orificio de 6 mm, la nueva placa mostro flujo normal sin taponamientos y aun así retuvo de manera parcial al soporte colonizado. Se colocó la nueva placa hasta un 80 % del lecho fluidizado, esto con el fin de utilizar el máximo espacio posible en la fluidización. Se realizó la prueba de expansión con la nueva placa de 6 mm, los resultados se muestran en la Figura 3.14.

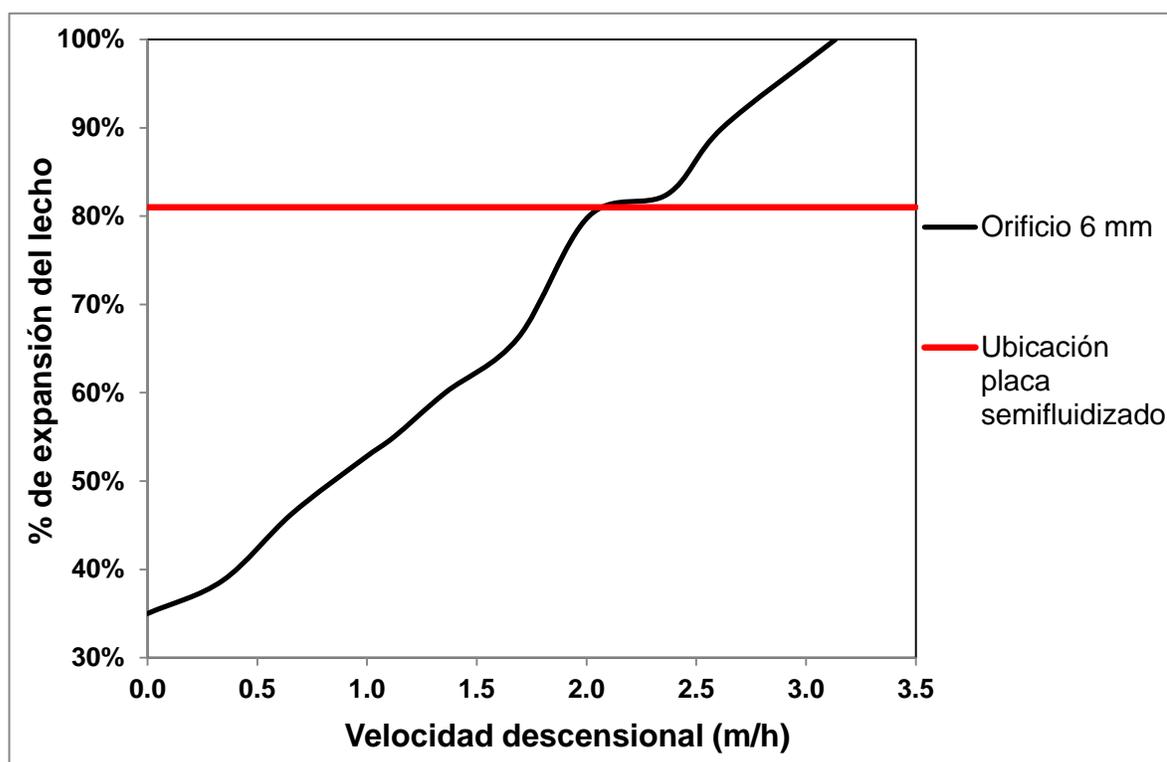


Figura 3.14 Resultados de pruebas de fluidización con soporte colonizado y placa de orificio de 6 mm

Esta placa aun cuando no fue capaz de retener el soporte dentro de la zona del lecho fluidizado por encima de velocidades descendenciales mayores a 2.3 m/h, si mostró una disminución de la expansión cuando el soporte colonizado atraviesa la misma, cumpliendo su función de lograr un lecho semifluidizado y a su vez evitar o al menos ralentizar la salida del soporte del reactor en su operación cotidiana tal como se observa en la Figura 3.15.



Figura 3.15 Placa de orificio de 6 mm reteniendo soporte colonizado

Después de operar el RLSFI durante 190 días, con diferentes sustratos y condiciones de operación (Cva, pH, velocidad descendencial) esta no mostro ningún signo de obstrucción ni taponamiento, aun cuando si se observó biomasa acumulada en ella.

### 3.3.3 Pruebas hidrodinámicas con soporte colonizado y presencia de biogás

Al repetir la prueba de expansión de soporte colonizado pero ahora en presencia de biogás producido por el RLSFI como resultado de la digestión anaerobia, se observó un marcado aumento en la expansión del soporte colonizado con la misma velocidad de líquido, tal como se aprecia en la Figura 3.16.

La expansión inicial del soporte colonizado sin operar la bomba de recirculación aumento en un 60% tan solo por el efecto del biogás, ya que este al desplazarse hacia la parte superior del RLSFI fluidiza por sí mismo el soporte y lo

descompacta promoviendo su movimiento. A su vez al operar la recirculación, esta logró fluidizarlo en un 100% con una velocidad descensional de 1.3 m/h.

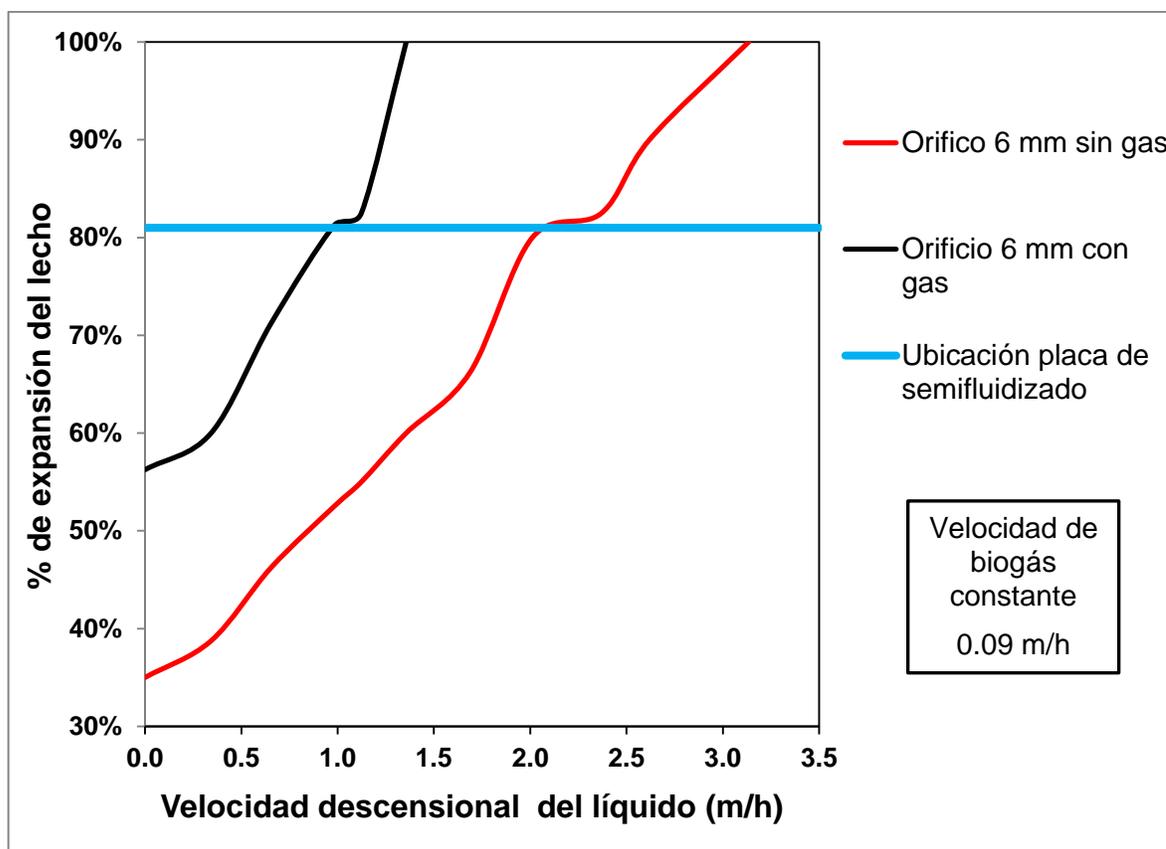


Figura 3.16 Placa de orificio de 6 mm en presencia y ausencia de biogás

Una de las principales desventajas de los RLFI es la necesidad energética y por ende económica, de bombas para lograr la fluidización del soporte (Kaparoju y Rintala., 2010). El hecho de poder disminuir su dependencia o incluso prescindir de ellas es un factor preponderante al momento de pensar en escalar el proceso a nivel industrial. Se puede ver que el biogás como subproducto del tratamiento de las aguas residuales que se tratan dentro de estos reactores, facilita enormemente la fluidización del soporte, tal como se demostró en las pruebas hidrodinámicas de expansión. En dicha prueba se logró fluidizar el soporte en un 100% con un 250% menos de velocidad descensional de líquido, lo que se transforma en un gran ahorro energético.

### 3.3.4 Comportamiento hidrodinámico del lecho durante la operación continua del RLSFI

Durante la operación continua del RLSFI por 190 días, se alimentó con diversas Cva las cuales fueron desde 3 gDQO/L\*d hasta 40 gDQO/L\*d, alcanzando con dichas cargas, tasas de producción de biogás hasta de 30 L/d. Esto tuvo efectos determinantes en las características de la expansión del lecho como se muestra en la Figura 3.19 y 3.20. A su vez el paulatino aumento de la biopelícula en el Extendosphere contribuyó de manera sinérgica a la elevada fluidización del soporte con mucho menos requerimiento energético.

#### 3.3.4.1 Efecto de la biopelícula sobre la fluidización del soporte

En la Figura 3.17 se muestra el incremento paulatino del grado de colonización del soporte, esto se determinó por el aumento de la MVA al mismo.

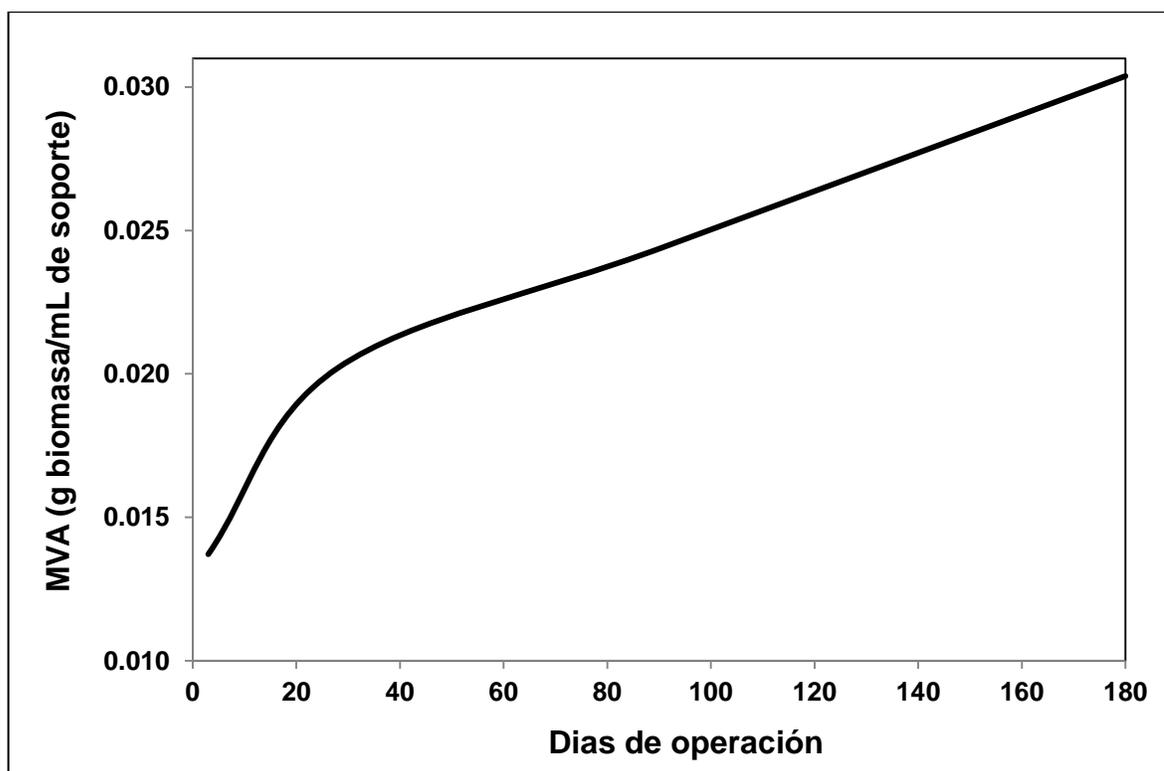


Figura 3.17 Aumento de la MVA al soporte durante la operación del RLSFI

El incremento en el grado de colonización a través del tiempo, se comprobó también por pruebas de microscopia como se ve en la Figura 3.18, la biopelícula formada sobre la superficie del soporte al día 180 de operación, muestra un marcado crecimiento con respecto al día 1 de operación.

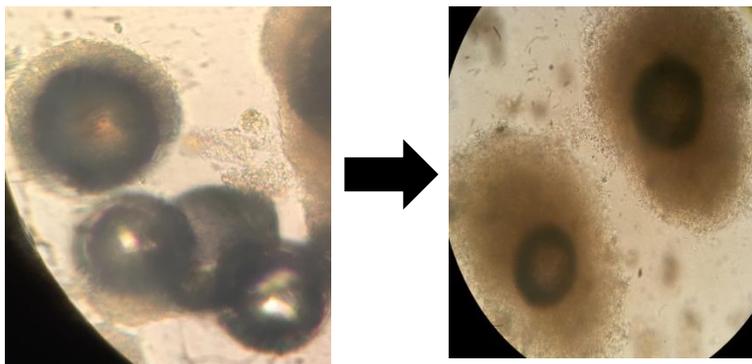


Figura 3.18 Comparación de la biopelícula adherida al soporte en el día 1 (izquierda) y en el día 180 (derecha).

Tal como (García - Calderón et al., 1998) menciona en su trabajo, el proceso de acumulación de biomasa provoca importantes cambios en las partículas fluidizadas, ya que al aumentar el tamaño de las mismas cambia también su densidad específica y sus características hidrodinámicas por lo que estas se fluidizan mucho más fácilmente con menor coste energético. Como se observa en la Figura 3.17 después de 190 días de operación se logró aumentar la MVA al soporte en un 100% con lo que aunado a la producción de biogás, logro un efecto de mayor fluidización con menor requerimiento energético, como se observa en la Figura 3.19 y 3.20.

#### **3.3.4.2 Efecto de la producción de biogás sobre la fluidización del soporte**

La producción de biogás estuvo estrechamente ligada a la expansión del soporte, ya que como se comprobó, al aumentar la producción de biogás disminuyó drásticamente la velocidad descendencial necesaria para mantener el soporte fluidizado dentro del RLSFI. Lo anterior se observa en la Figura 3.19

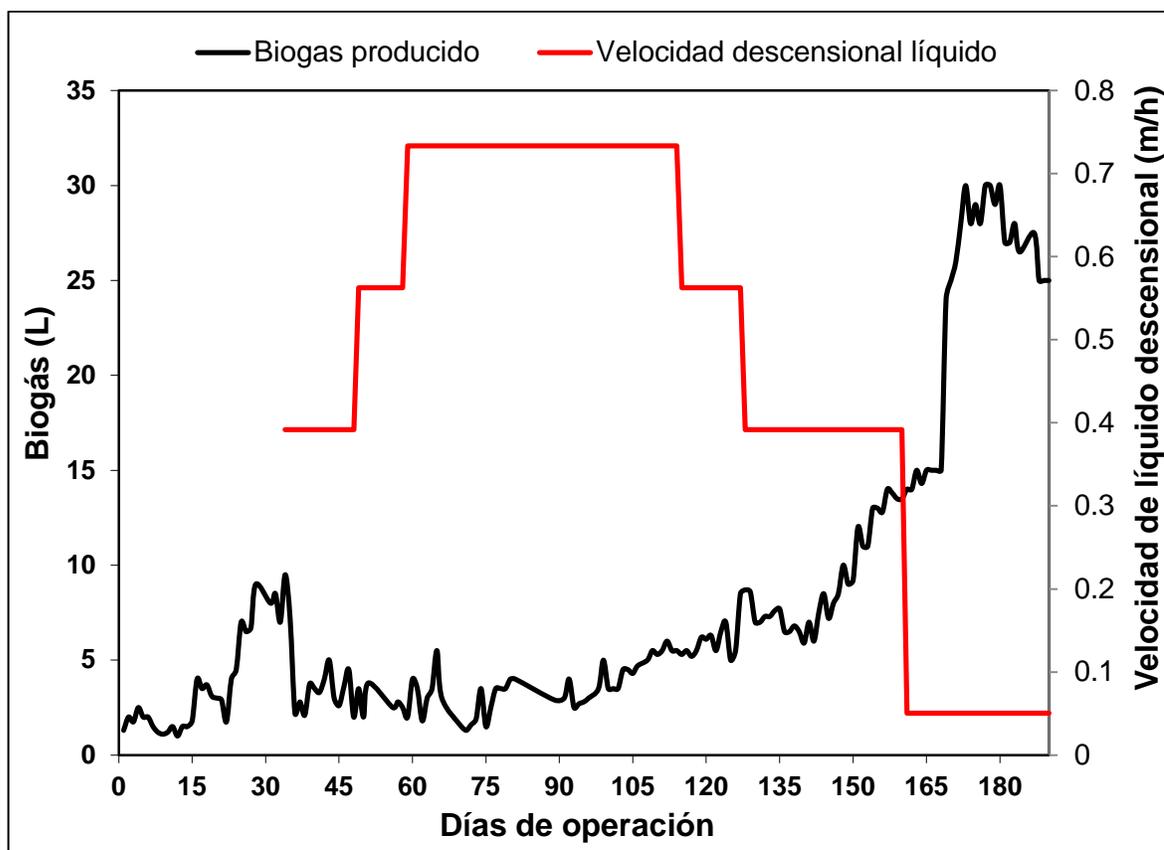


Figura 3.19 Relación entre la producción diaria de biogás y la velocidad descendencial utilizada dentro del RLSFI.

Entre el día 40 y el día 130 de operación se observaron tasas diarias de producción de biogás promedio de 5 L, con las cuales eran necesarias velocidades descendenciales de hasta 0.7 m/h para mantener el soporte fluidizado, por lo que la bomba peristáltica de operación no bastó y se aumentó la velocidad con una bomba peristáltica de recirculación. Con el paulatino aumento de la Cva al RLSFI, incrementó la producción de biogás diaria hasta 30 L, lo cual trajo como consecuencia una disminución en la velocidad descendencial necesaria de hasta un 86%. A partir del día 160 de operación, el soporte se logró fluidizar hasta en un 100% sin necesidad de operar la bomba de recirculación, con una velocidad descendencial de líquido de 0.05 m/h, lo cual significó un gran ahorro energético. Lo anterior se observa en la Figura 3.20

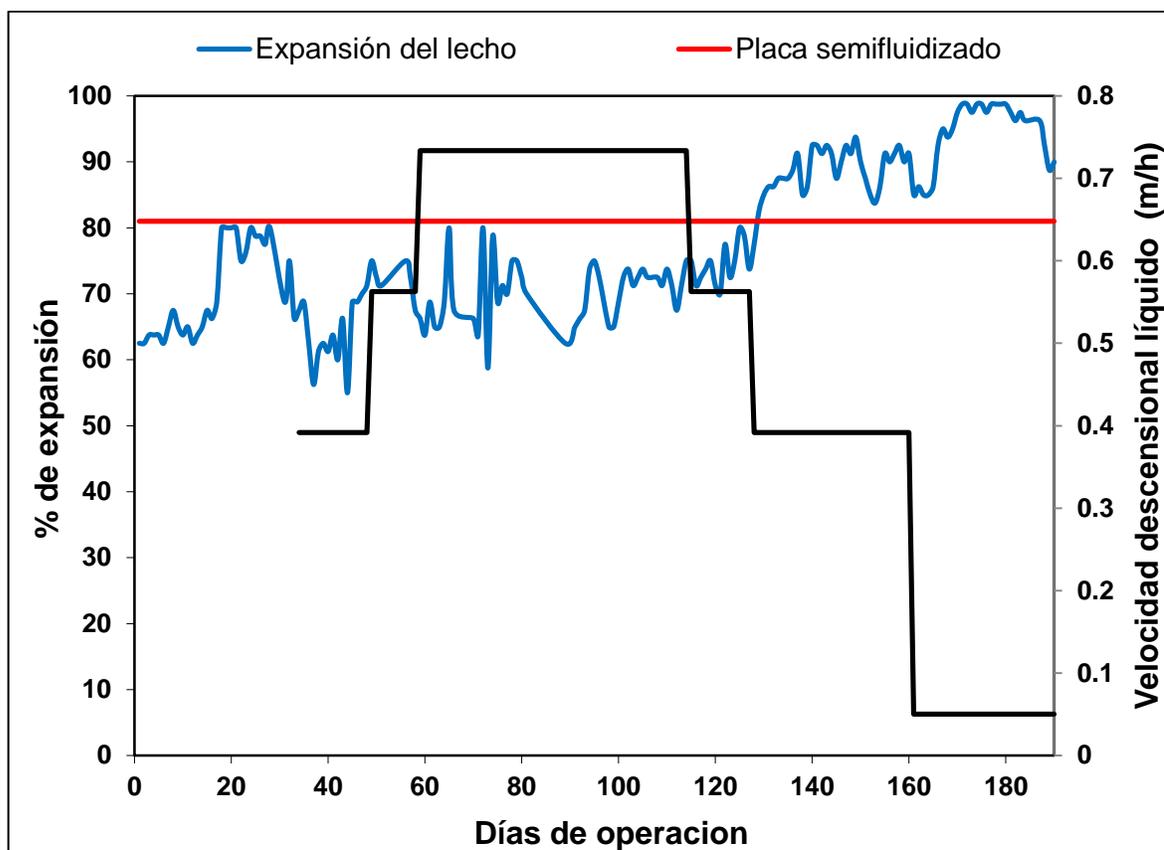


Figura 3.20 Relación entre la velocidad descendencial y el porcentaje de expansión dentro del RLSFI.

A partir del día 130 de operación se empezó a rebasar el 80% de expansión dentro del RLSFI correspondiente a la placa de semifluidizado, con una velocidad descendencial de hasta 0.05 m/h, lo cual comprueba el efecto sinérgico que tiene la producción de biogás aunado al aumento del tamaño de la biopelícula sobre la expansión del soporte. En el día 170 se alcanzaron tasas de producción de biogás de 30 L/d debido a que se aumentó la Cva hasta 40 gDQO/L\*d por lo que el soporte se fluidizó hasta un 100%, pero aun así mostrando un comportamiento hidrodinámico estable.

El cambio en la fluidización del soporte también se puede observar comparando la velocidad descendencial del líquido y la velocidad del biogás que se tuvieron dentro del RLSFI, como se observa en la Figura 3.21.

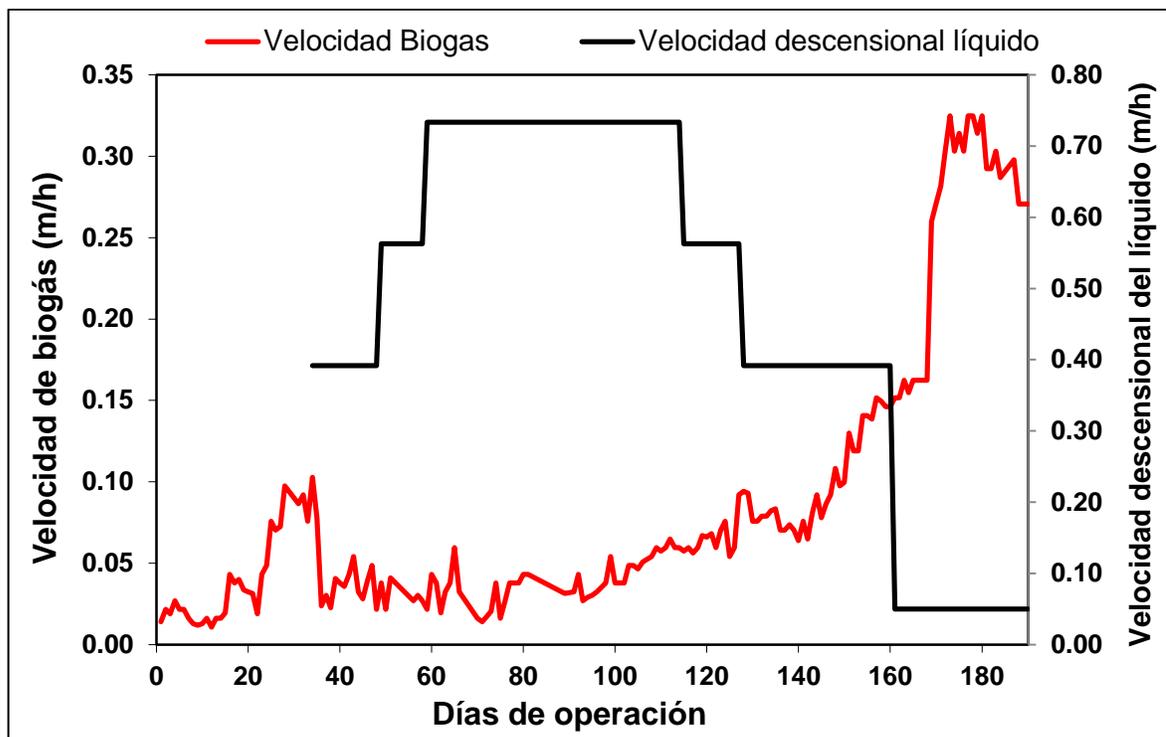


Figura 3.21 Relación entre la velocidad descendencial y velocidad de biogás dentro del RLSFI.

La velocidad del biogás varió proporcionalmente en función de la producción de biogás diaria, fue hasta el día 34 de operación que se monitoreo la velocidad descendencial del líquido como se observa en la Figura 3.21. Se puede observar claramente que al aumentar la velocidad de biogás disminuyo drásticamente la velocidad descendencial de líquido necesaria para expandir el lecho, esto resulta evidente a partir del día 134 de operación que debido al aumento de la Cva y por ende producción de biogás diaria, el RLSFI se operó con velocidades de líquido de hasta 0.05 m/h. La velocidad descendencial del líquido a partir del día 160 se operó en el nivel más bajo posible (0.05 m/h) correspondiente únicamente al flujo de alimentación del sustrato. Es decir la bomba de recirculación se retiró del RLSFI y aun así el soporte permaneció expandido hasta en un 100%.

Cabe destacar la importancia energética y por ende económica que tiene el poder mantener porcentajes de fluidización de hasta un 100% dentro del RLSFI con velocidades descendenciales mínimas y con tan solo la operación de una bomba de alimentación, sin necesidad de operar una bomba de recirculación.

### 3.4 Inoculación y arranque del RLSFI

Se inoculó el reactor con 1000 mL de soporte colonizado y se inició la alimentación del reactor usando como sustrato el efluente del reactor de hidrolisis pre-hidrolizado ubicado en Planta Piloto (PP) del Tecnológico de Orizaba, dicho reactor se alimentaba a partir de Residuos Sólidos Orgánicos Municipales (RSOM) provenientes del mercado local. Las características de dicho sustrato se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Características del sustrato pre-hidrolizado de RSU alimentado al RLSFI.

Parámetro	Unidad	Resultado
pH	-	7
DQOt	g/L	30.3
DQOs	g/L	28.5
ST	g/L	25.6
SV	g/L	19.8

Como se observa, el sustrato alimentado inicialmente al RLSFI tuvo un pH neutro además de presentar una alta carga orgánica, debido a la heterogeneidad de nutrientes presentes en los RSOM lo vuelve un sustrato ideal para iniciar la operación biológica y estabilización del RLSFI sin necesidad de agregar nutrientes adicionales. Uno de los principales factores en contra de los RLFIs son los elevados tiempos de arranque, aunque se han implementado diversas estrategias de arranque e inoculación como Alvarado-Lassman *et al.*, (2008) lo menciona en su trabajo, el hecho de iniciar la operación de un reactor biológico a partir de un inóculo previamente colonizado, permite tiempos de arranque y estabilización muy cortos tal como se comprobó en este trabajo.

### 3.5 Operación en continuo del RLSFI

El RLSFI se operó en continuo durante 190 días, se dividió en 4 fases la operación del mismo, tal como se muestra en la Tabla 3.3

Tabla 3.3 Fases de operación del RLSFI.

Fase		Días	Sustrato	Objetivo
1	Arranque y estabilización	1 - 34	Efluente pre-hidrolizado del RLF de PP	Iniciar la operación del RLSFI y estabilizar sus condiciones
	Cambio a sustrato cítrico	35	Sustrato Cítrico	Aclimatar el RLSFI al sustrato cítrico y estabilizarlo
2	Estabilización con sustrato cítrico	35 - 125		
3	Aumento paulatino de Cva	125 - 190		Aumentar la Cva

El RLSFI se situó en un cuarto de temperatura controlada a 35° C para favorecer la digestión anaerobia. El flujo de alimentación diaria fue de 8 L, manteniendo un TRH de 0.4 d durante. Esto no cambio durante los 190 días de operación.

#### 3.5.1 Carga Volumétrica Aplicada (Cva)

En la etapa 1 de la operación del RLSFI se inició con una Cva promedio de 5 gDQO/L\*d. Esta se mantuvo durante 35 días hasta estabilizar el RLSFI, cabe destacar que la Cva osciló en un rango de +- 2 gDQO/L\*d esto debido al ajuste diario de las diluciones correspondientes para lograr la carga establecida. Posteriormente al cambiar al sustrato cítrico en el día 35, se observaron algunos efectos en los parámetros biológicos del reactor, por lo que se mantuvo la misma Cva para continuar estabilizándolo durante la etapa 2. En la etapa 3 a partir del

día 125 de operación, se incrementó paulatinamente la Cva hasta alcanzar 16 gDQO/L\*d. En el periodo comprendido entre el día 166 – 185, se aumentó la carga hasta 40 gDQO/L\*día, esto con el fin de probar el desempeño del RLSFI operando con Cva altas, tales como las que la industria cítrica emana en sus aguas residuales. Lo anterior se observa en la Figura 3.22

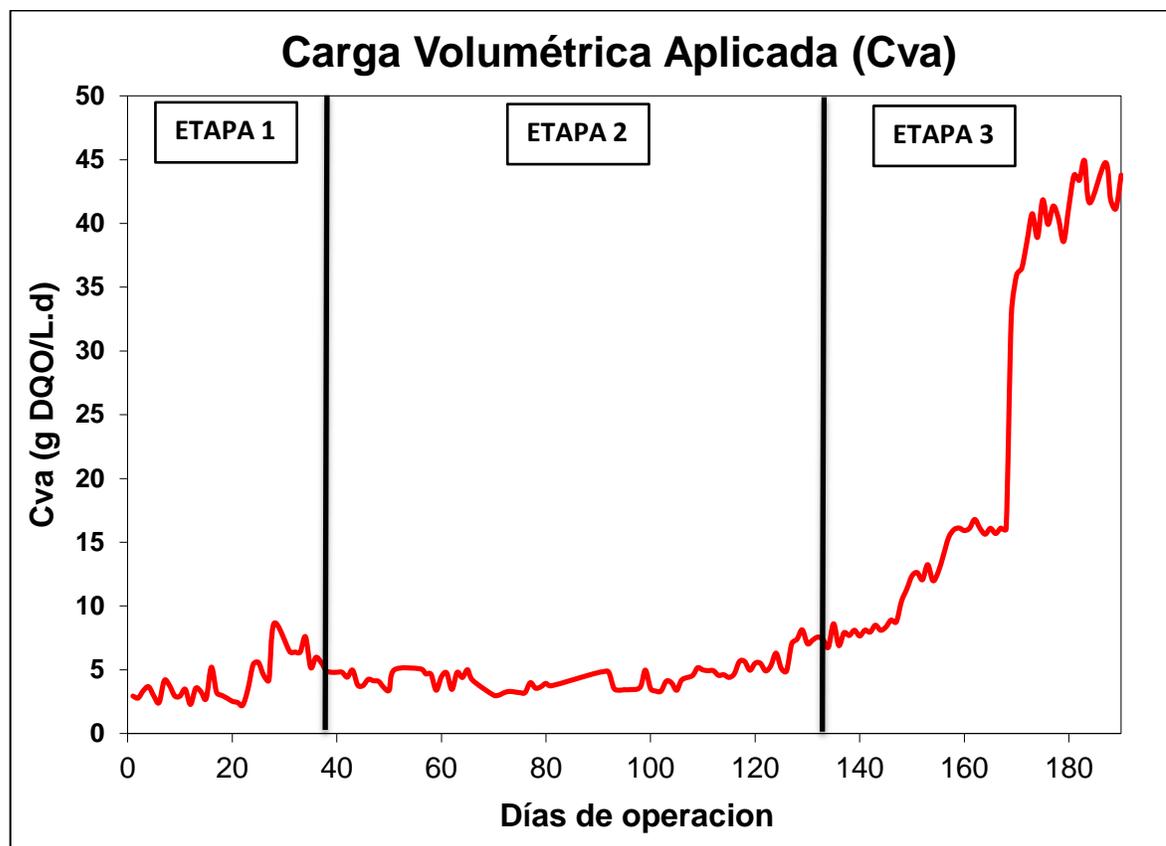


Figura 3.22 Cva aplicada al RLSFI durante la operación en continuo.

La Cva se aumentó con el incremento de la concentración de entrada del sustrato, sin mover el flujo de alimentación diario, esto con el fin de no disminuir el TRH del RLSFI y evitar taponamientos en el sistema de alimentación al reactor por la pequeña cantidad de flujo bombeado.

En la literatura científica no existen trabajos previos reportados de reactores biológicos (no solo de lecho fluidizado) que hayan operado con sustrato cítrico a Cva mayores a 8 gDQO/L\*d tal como se observa en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Cva manejadas por trabajos previos con residuo cítrico.

Cva (gDQO/L*d)	Tipo de reactor	Año	Autores
0.312 – 4.175	Lecho fijo de flujo ascendente	1993	Valdés <i>et al.</i>
1.5 – 5	Tanque completamente agitado	2010	Martin <i>et al.</i>
0.51	Flujo estacionario descendente de biopelícula fija	2013	Koppar y Pullammanappallil
8	Reactor anaerobio híbrido	2015	González - Paz

El hecho de poder operar reactores biológicos de tratamiento de aguas residuales con sustratos cítricos a Cva elevadas es de vital importancia debido a las características que presentan los residuos de la industria cítrica las cuales son elevadas concentraciones de materia orgánica y flujos.

### 3.5.2 DQO del influente y efluente del RLSFI

El sustrato pre-hidrolizado que se alimentó al RLSFI durante la primera etapa, tuvo una concentración de DQO promedio de 2 g/L mientras que la del efluente fue de hasta 300 mg/L. En la etapa 2 con el sustrato cítrico se mantuvieron concentraciones de entrada y salida similares ya que se mantuvo la misma Cva, en la etapa 3 de aumento de Cva, es donde se llegaron a alcanzar en el día 170 concentraciones de entrada de hasta 19.5 g/L, mientras que en el efluente fueron de 10 g/L. Lo anterior se refleja en la Figura 3.23

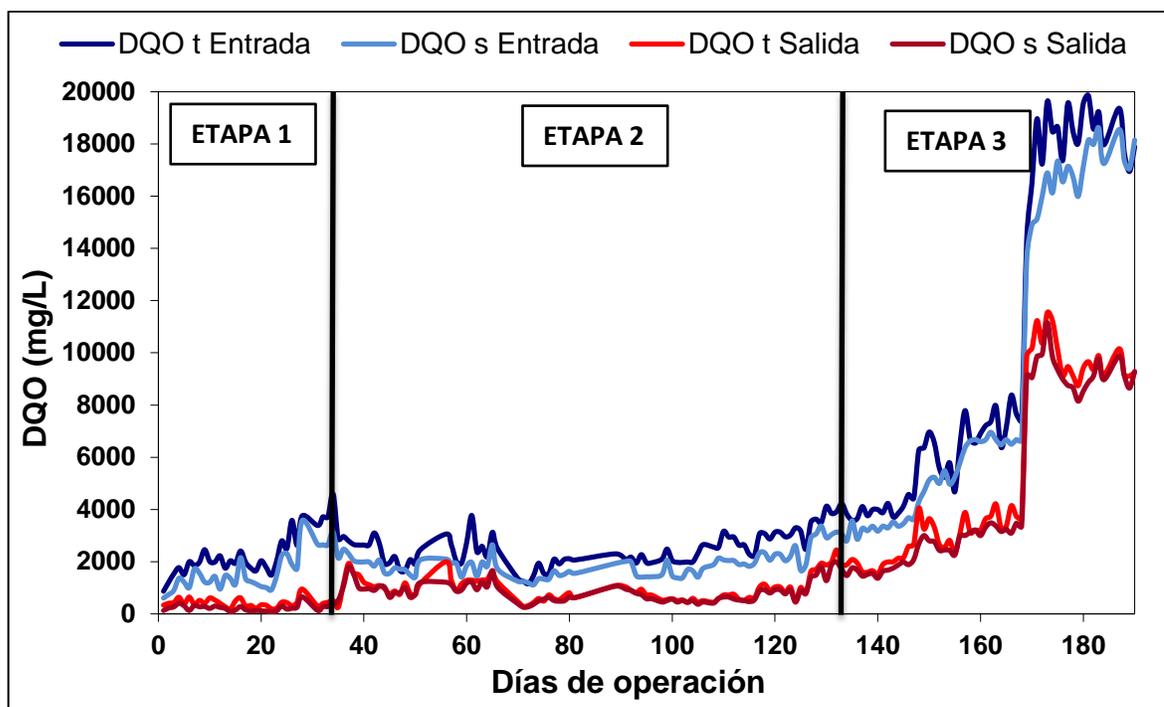


Figura 3.23 DQO de influente y efluente del RLSFI durante la operación en continuo.

Los RLFIs tienen la característica primordial de poder tratar efluentes con alta carga orgánica como lo menciona Buffière *et al.*, (2000), se debe primordialmente al consorcio bacteriano adherido al material de soporte (Sowmeyan y Swaminathan, 2008) esto les confiere una gran ventaja operacional comparado con otro tipo de reactores biológicos. Como se observa en la Figura 3.23 el RLSFI se alimentó en la etapa 3 con un sustrato de hasta 19.5 g/L.

### 3.5.3 Comportamiento del pH

La digestión anaerobia como todo proceso biológico es altamente sensible a los cambios de pH, para que esta se lleve a cabo de manera adecuada requiere un pH de entre 6.5 – 7.5 (Mata-Álvarez *et al.*, 2014). El trabajo en reactores biológicos con sustratos cítricos representa un gran reto debido en parte a su pH marcadamente ácido (Cerón - Salazar y Cardona - Alzate., 2011) y la presencia en los residuos cítricos de diversos ácidos orgánicos tales como el ácido cítrico,

ácido tartárico, ácido málico y ácido oxálico que condicionan un pH ácido. En la Figura 3.24 se puede observar el comportamiento del pH dentro del RLSFI.

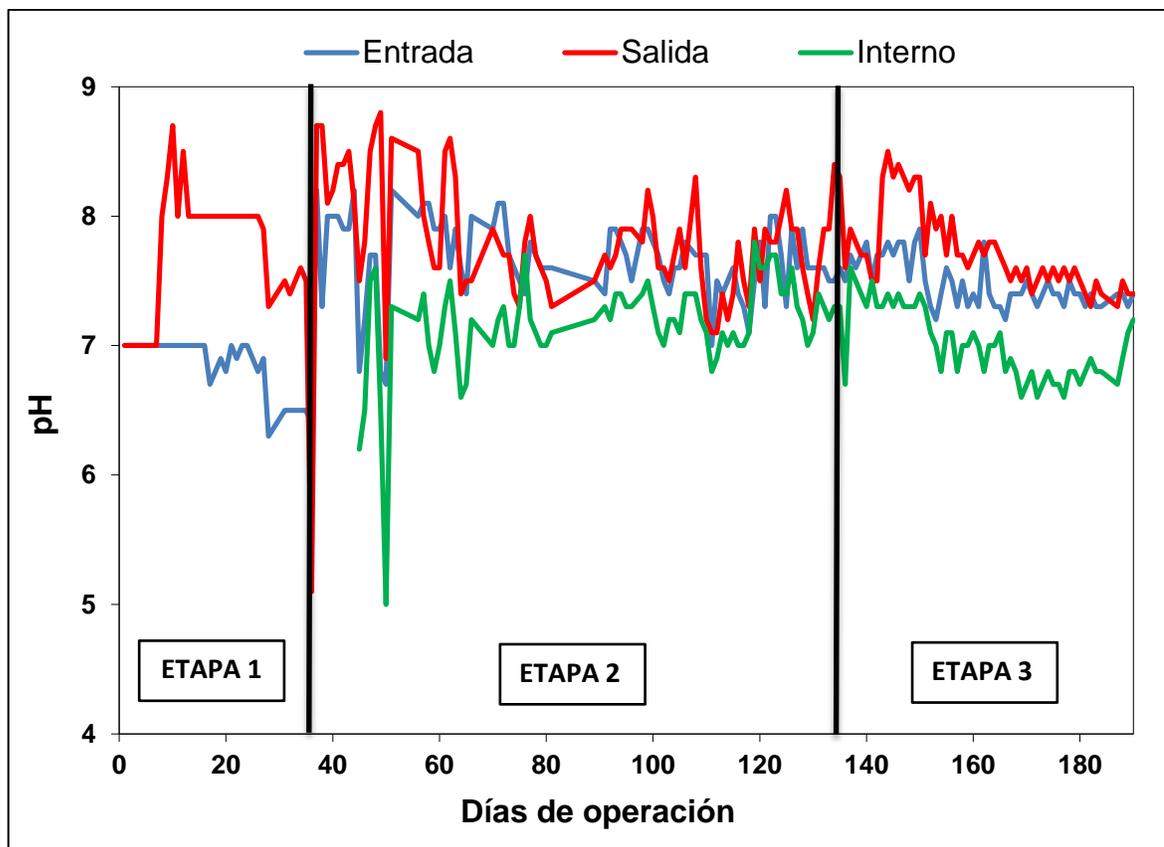


Figura 3.24 Comportamiento del pH dentro del RLSFI durante la operación en continuo.

Durante la etapa 1 en la cual el RLSFI fue alimentado con el sustrato prehidrolizado el comportamiento del pH fue estable, con un pH de entrada neutro y de salida un pH promedio de 8, esto debido a la capacidad buffer del reactor, en esta etapa no se neutralizó el influente, debido a ello se observa una oscilación del pH pero sin eventualidades. En la etapa 2, a partir del día 35 de operación se inició el cambio a sustrato cítrico observándose un rápido descenso de pH en el efluente del RLSFI cayendo hasta pH 5, aun cuando el influente se neutralizó con  $\text{NaHCO}_3$ . Debido a lo anterior se aumentó el pH del influente hasta 8, para tratar de paliar la acidez del reactor. A partir del día 45 se monitoreó el pH interno, para poder tener un control más fidedigno del comportamiento biológico del RLSFI.

Fue hasta el día 56 de operación cuando se estabilizó el comportamiento de pH en el RLSFI, esto se observó en el pH tanto del efluente así como del interior del reactor. Esto se debe a que el consorcio bacteriano se aclimató rápidamente al nuevo sustrato cítrico que se le alimentó. En la etapa 3 en la que se incrementó la Cva del RLSFI, no se observó una acidificación del reactor, aun cuando el pH del efluente e interno disminuyó hasta valores cercanos a 7. Lo anterior significa que la digestión anaerobia transcurrió eficientemente sin detenerse en la acidogénesis, se presume fue debido al buen desarrollo de la biopelícula dentro del soporte y a la ventaja operativa que tuvo partir de un inoculo colonizado y aclimatado a digerir residuos de frutas y verduras.

Diversos estudios en reactores biológicos con efluentes cítricos tales como: (Siles *et al.*, 2010), (Kaparoju y Rintala., 2010), (González – Paz., 2015) y (Koppar y Pullammanappallil, 2013) ajustaron el pH del sustrato alimentado a pH neutro o incluso mayores hasta pH 8, esto con el fin de evitar la acidificación del reactor por las características inherentes del sustrato. A su vez algunos autores tales como (Koppar y Pullammanappallil, 2013) trabajaron con pH marcadamente básicos cercanos a 9 obteniendo buenos resultados en la estabilidad del reactor.

La cantidad de  $\text{NaHCO}_3$  adicionada al sustrato cítrico que se alimentó al RLSFI fue de alrededor de 40 g/d. Se seleccionó este agente neutralizante debido a estudios previos por parte de González – Paz., (2015) en los que se probó la neutralización con NaOH y  $\text{NaHCO}_3$ , observando mejores resultados con el segundo, debido a que este no aglutinó la pectina presente en la cascara de naranja, lo cual traía consigo problemas de taponamiento en los sistemas de alimentación al reactor.

Al operar reactores biológicos con sustratos cítricos es de vital importancia el control constante del pH, en el trabajo que se desarrolló se observa claramente que es posible aplicar altas cargas orgánicas de hasta 40 gDQO/L\*d sin presentar problemas de acidificación o inhibición por pH.

### 3.5.4 Remoción de DQO

El objetivo principal de los RLF es la remoción de materia orgánica del influente, esto se logra a través de la actividad metabólica del consorcio bacteriano adherido al soporte. (Vaccari *et al.*, 2006). Para poder evaluar la remoción de contaminantes del sustrato, se puede llevar a cabo en base a la determinación de diversos parámetros tales como la DQO, cantidad de sólidos totales y volátiles, turbidez, Carbono Orgánico Total (COT), etc. Para el desarrollo de este trabajo se realizó en base a los gramos de DQOt y DQOs removidos del sustrato. Los resultados descritos en % de remoción, se pueden observar en la Figura 3.25.

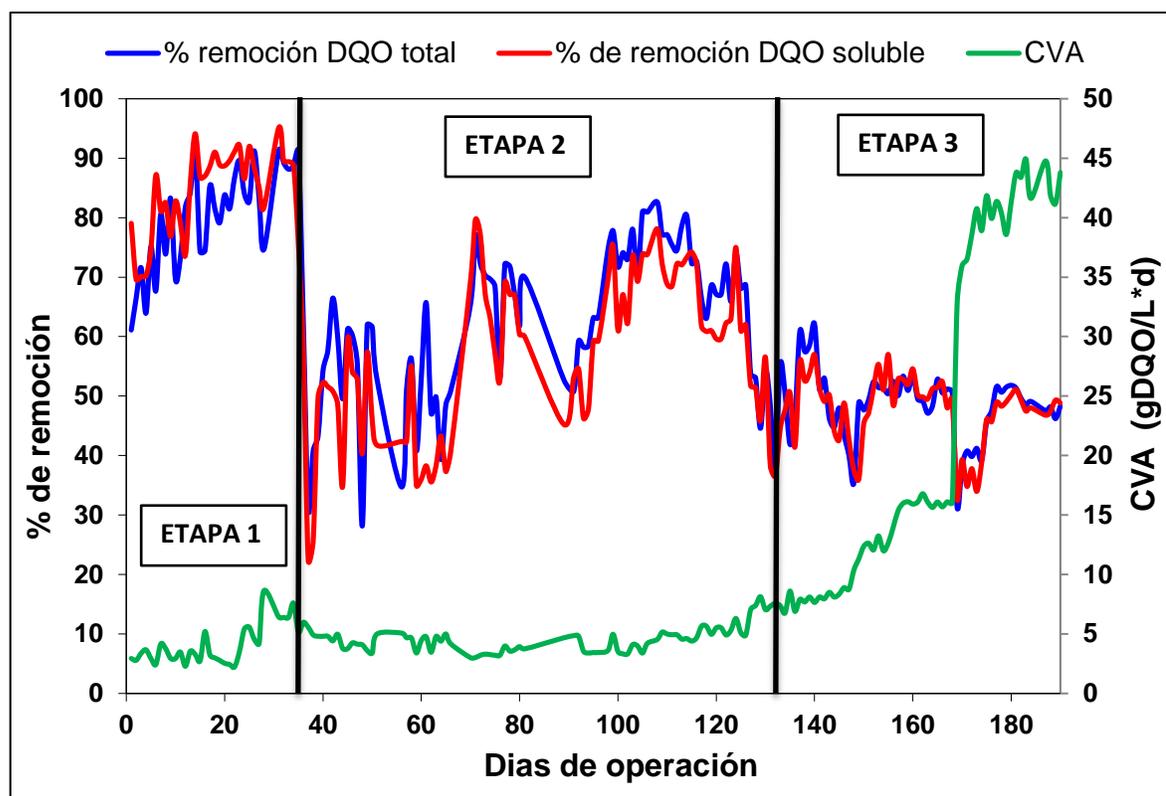


Figura 3.25 Comportamiento de la remoción de DQO y Cva del RLSFI durante la operación en continuo.

Como se observa en la Figura 3.25, en la etapa 1, al primer día de operación se observaron remociones de 80% de DQOs. Esto se debe a que se inició la operación del RLSFI con un inóculo activo y colonizado también influyó

determinantemente el continuar usando el mismo sustrato al que el consorcio bacteriano estaba habituado. Para el día 34 de operación se obtuvieron remociones de DQO de hasta 95% indicando el buen desarrollo operacional del reactor. En la etapa 2 en la cual se cambió al sustrato cítrico se observó una marcada caída en la remoción a partir del día 35, llegando a descender hasta un 22% esto resulta normal debido al cambio brusco en el sustrato alimentado, fue a partir del día 71 en el que las bacterias fueron capaces de degradar eficientemente el nuevo sustrato cítrico, viéndose reflejado en el aumento de la remoción de DQO la cual alcanzo valores cercanos al 80%. Durante este periodo de tiempo y hasta el día 124 se estabilizó la remoción de DQO en valores promedio de 75% cabe resaltar que la Cva se mantuvo constante en 5 gDQO/L\*d durante todo este lapso de operación. En la etapa 3 correspondiente al aumento de la Cva se puede observar un paulatino descenso en la remoción, debido a la elevación en la concentración de materia orgánica presente en el sustrato, para el día 157 se mantuvo una Cva de 16 gDQO/L\*d, estabilizándose la remoción de DQO en un 50%. En el periodo comprendido entre el día 157 al día 165 se observa una estabilización en la remoción de DQO en un 55% aun cuando el reactor se operó con Cva relativamente altas. A partir del día 170 se elevó la Cva hasta 40 gDQO/L\*d viéndose reflejado en una caída de remoción de DQO, pero a diferencia de la etapa 1, le llevo al RLSFI solo 3 días aclimatarse a la nueva carga y volver a estabilizar la remoción en un 50%.

Dentro de los trabajos realizados con sustrato cítrico por otros autores, podemos observar que estos han alcanzado tasas de remoción más altas, hasta de un 90% como se ve en la Tabla 3.5. Al momento de remover la materia orgánica, el Tiempo de Residencia Hidráulico (TRH) es un factor primordial, ya que determina el tiempo de exposición del compuesto orgánico al consorcio bacteriano, por lo que resulta lógico pensar que a mayor TRH se pueden alcanzar mayores tasas de remoción.

Tabla 3.5 Remociones de DQO alcanzadas por trabajos previos con residuo cítrico.

TRH (d)	DQO removida (%)	Tipo de reactor	Año	Autores
1-4	77.5 – 97.2	Lecho fijo de flujo ascendente	1993	Valdés <i>et al.</i>
2-3	84	Tanque completamente agitado	2010	Martin <i>et al.</i>
16	-	Flujo estacionario descendente de biopelícula fija	2013	Koppar y Pullammanappallil
1	90	Reactor anaerobio híbrido	2015	González - Paz

El TRH del RLSFI operado en el presente trabajo se mantuvo constante en 0.4 d, el cual se sitúa muy por debajo de trabajos previos. Esto resulta muy importante al momento de pensar en escalar el proceso a nivel piloto o industrial.

### 3.5.5 Producción de biogás

La digestión anaerobia no solo disminuye la concentración de materia orgánica en los efluentes también tiene una gran ventaja la cual es la producción de un bioenergético: el biogás. Dicho elemento una vez tratado es capaz de utilizarse en motores eléctricos, generadores, motores de combustión interna, etc. (Hidalgo y García., 2012)

El RLSFI mostro producción de biogás desde el primer día de operación, tal como se observa en la Figura 3.26, durante la etapa 1 la producción de biogás se mantuvo constante en 5 L hasta el día 28 en la que se aumentó la producción de biogás de manera premeditada para poder realizar las pruebas hidrodinámicas descritas anteriormente. En la etapa 2 al cambiar al sustrato cítrico, el RLSFI no mostro un marcado descenso en la producción de biogás, lo cual comprueba el buen grado de colonización del inóculo colonizado y su buen desarrollo durante la

etapa 1. Durante la etapa 3 de incremento de carga, se pudo observar un aumento perfectamente proporcional en la producción de biogás, en el día 165 en el cual se aumentó marcadamente la Cva hasta 40 gDQO/L\*d se produjo biogás a una tasa promedio de 30 L/d, comprobando que el sustrato cítrico concentrado es una excelente opción para ser tratado por digestión anaerobia obteniendo energía verde a través del biogás.

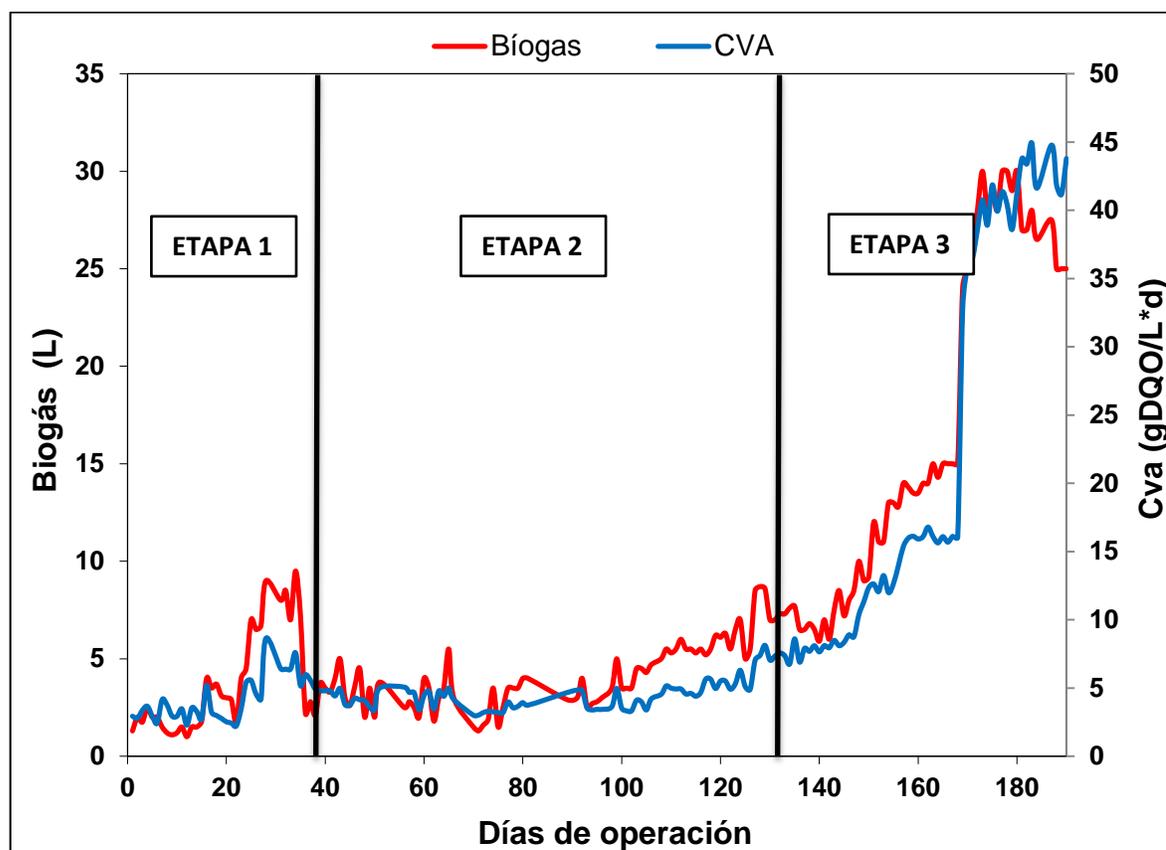


Figura 3.26 Producción de biogás Cva del RLSFI durante la operación en continuo.

Durante el monitoreo diario al RLSFI también se determinó la calidad del biogás producido a través del porcentaje de metano presente en él, en la Figura 3.27 se observan los resultados. El biogás producido es una mezcla de gases emanados por diferentes grupos bacterianos presentes en el RLSFI y es altamente sensible a variables como el pH, temperatura y preponderantemente a la composición química del sustrato alimentado. (Gerardi., 2003).

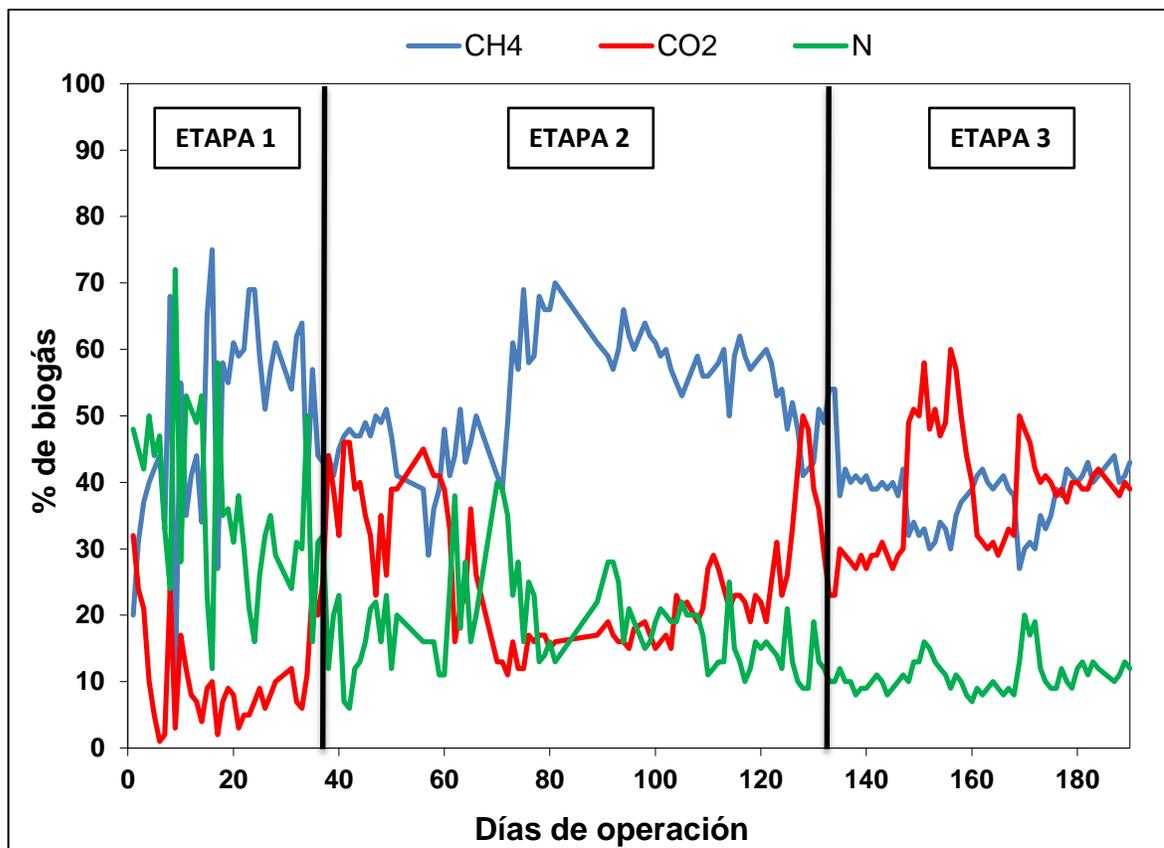


Figura 3.27 Composición del biogás producido en el RLSFI durante la operación en continuo.

En la Figura 3.27 se puede observar que en la etapa 1, la cantidad de metano en el biogás alcanzó niveles de pureza de hasta el 70% y niveles de Dióxido de Carbono menores al 20% lo cual se traduce en un biogás de muy alta calidad. Esto debido esencialmente a la facilidad con la que las bacterias eran capaces de asimilar y convertir el sustrato pre-hidrolizado. En la etapa 2 con el sustrato cítrico se observó un descenso en la cantidad de metano cayendo hasta un 29% y un marcado aumento en el Nitrógeno y Dióxido de Carbono. A partir del día 80 la cantidad de metano en el biogás se mantuvo estable en un promedio de 60%, lo cual coincide con la fase de estabilidad lograda con el sustrato cítrico.

En la etapa 3 al aumentar la carga en el RLSFI la cantidad de metano descendió y se mantuvo en un promedio de 40%, esto se explica por la dificultad de las bacterias metanogénicas de poder convertir eficientemente todo el sustrato cítrico alimentado.

Dentro de la bibliografía científica, no existen datos cuantitativos reportados de producciones de biogás en reactores biológicos en modo continuo con sustratos cítricos, ya que la mayoría reporta coeficientes de rendimiento de metano ( $Y$ ) el cual se abordara más adelante. Koppa y Pullammanappallil., (2013) en su trabajo con residuos cítricos reportaron concentraciones máximas de metano en el biogás no mayores a 50% en su fase óptima de operación, posteriormente con la acidificación del reactor el contenido de metano decreció hasta un 40%. En el presente trabajo se lograron composiciones de metano de hasta 70%, aunque al momento de elevar la carga no fue posible rebasar el 45% de metano presente en el biogás. Algunos estudios como el de Ferrer y Pérez., (2010) adjudican este hecho al mayor crecimiento de diversos grupos bacterianos altamente degradante pero ajenos a los metanogénicos cuando se manejan elevadas concentraciones de DQO dentro de los reactores.

### 3.5.6 Rendimiento de metano ( $Y$ )

El rendimiento de metano comúnmente expresado en  $L_{CH_4}/gDQO$  removidos, es un coeficiente que permite conocer el grado de conversión de materia orgánica removida que se convierte activamente en metano. Los componentes orgánicos removidos en los reactores biológicos se transforman esencialmente en dos componentes principales: biogás y biomasa. Un reactor biológico estabilizado debe exhibir rendimientos de metano cercanos a  $0.35 L_{CH_4}/gDQO$  (Gerardi., 2003)

En la Figura 3.28 se observa el comportamiento del rendimiento de metano dentro del RLSFI. Como se puede notar, en la etapa 1 para el día 27, se alcanzaron rendimientos de metano promedio de hasta  $0.30 L_{CH_4}/gDQO$  indicando la rápida estabilización y aclimatación del reactor, debido a esto y a las altas remociones de

DQO fue que se decidió hacer el cambio al sustrato cítrico para el día 35. En la etapa 2, en el día 36 se observa un rápido descenso en el rendimiento de metano debido a la aclimatación del consorcio bacteriano al nuevo sustrato cítrico. A partir del día 90 se observa un aumento y estabilización en el rendimiento de metano de hasta  $0.3 \text{ L}_{\text{CH}_4}/\text{gDQO}$  lo cual coincidió también con la estabilización de remoción de DQO, esto refleja la buena degradación del sustrato cítrico y la estabilidad del RLSFI. En la etapa 3 de aumento de carga se observó un descenso en el rendimiento de metano, llegando a estabilizarse cercano a  $0.19 \text{ L}_{\text{CH}_4}/\text{gDQO}$ , con cargas de  $40 \text{ gDQO}/\text{L} \cdot \text{d}$ . Esto se justifica debido a las cargas tan altas manejadas en esta etapa.

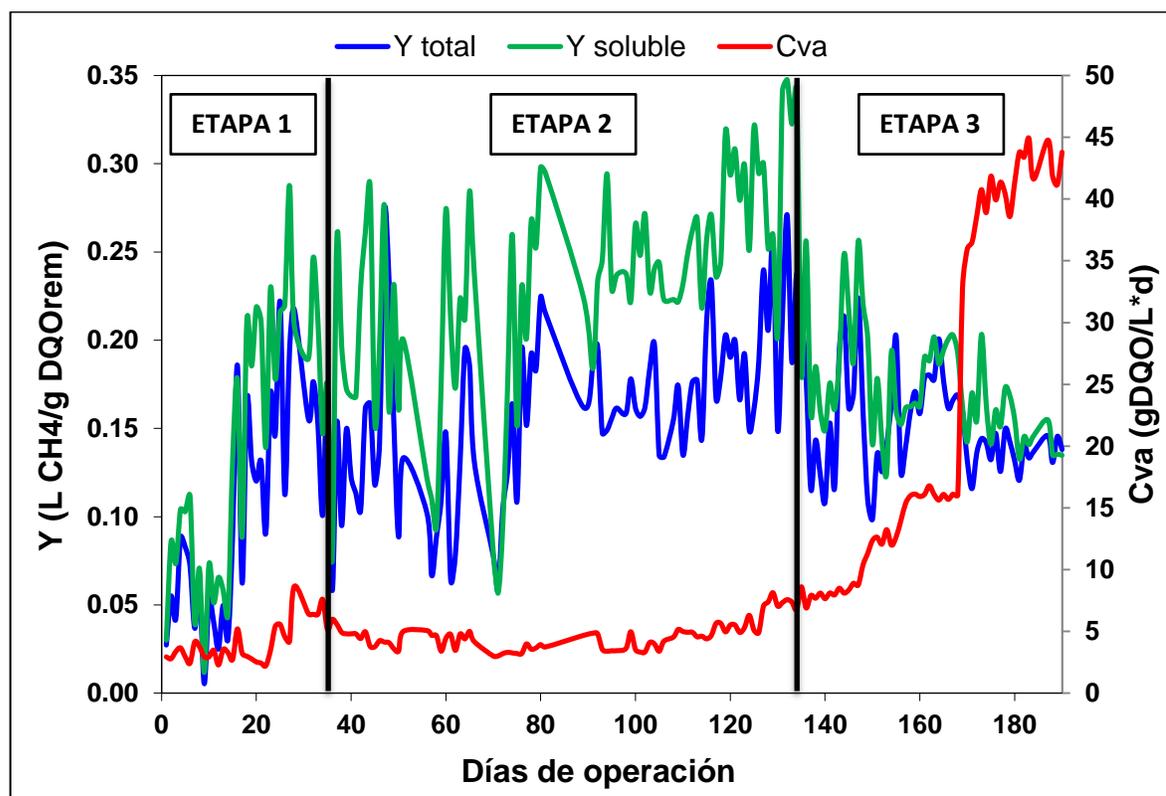


Figura 3.28 Rendimiento de metano en el RLSFI durante la operación en continuo.

Diversos trabajos previos con sustratos cítricos, han reportado rendimientos de metano de hasta 0.38, como se observa en la Tabla 3.6. Esto se debe principalmente a las muy bajas cargas manejadas.

Tabla 3.6 Rendimientos de metano alcanzadas por trabajos previos con residuo cítrico.

<b>Cva (d)</b>	<b>Y L<sub>CH4</sub>/gDQO</b>	<b>Tipo de reactor</b>	<b>Año</b>	<b>Autores</b>
0.312 – 4.175	0.3 – 0.381	Lecho fijo de flujo ascendente	1993	Valdés <i>et al.</i>
1.5 - 5	0.297	Tanque completamente agitado	2010	Martin <i>et al.</i>
0.51	0.238	Flujo estacionario descendente de biopelícula fija	2013	Koppar y Pullammanappallil
8	0.25	Reactor anaerobio hibrido	2015	González - Paz

Como se observa, la influencia de la Cva es preponderante para poder alcanzar rendimientos de metano elevados, aunque no existen precedentes de trabajos anteriores con cargas tan elevadas como las logradas en el presente trabajo.

### 3.6 Comparación del RLSFI con trabajos previos

Diversos estudios se han llevado a cabo con sustratos cítricos obteniendo resultados exitosos en términos de remociones de DQO y estabilidad del bioreactor. En la Tabla 3.7 se observa la comparación parámetro a parámetro de los trabajos previos que existen en bibliografía y los obtenidos en este trabajo.

A pesar de los buenos resultados obtenidos en trabajos previos, todos han sido con Cva muy bajas, no mayores a 8 gDQO/L\*d. Esto representa un problema operativo al momento de pensar en escalar el proceso a nivel industrial, ya que los efluentes de la industria cítrica rondan cargas cercanas a los 35 g/L de DQO con muy altos flujos de producción diaria cercanos. Esto aunado a las características de pH marcadamente ácido, vuelve complejo el tratamiento biológico de este tipo de residuos, es por ello que trabajos anteriores no pudieron lograr cargas más altas sin inhibir el reactor.

Tabla 3.7 Comparación del RLSFI con trabajos previos

Parámetro	Autor/Año				
	Valdés <i>et al.</i> 1993	Martín <i>et al.</i> 2010	Koppar y Pullammanappallil, 2013	González – Paz, 2015	Presente trabajo
Tipo de reactor	Lecho fijo de flujo ascendente	Tanque completamente agitado	Biopelícula fija de flujo descendente	Reactor anaerobio híbrido	RLSFI
Medio de soporte	Anillos raschig	----	----	Extendosphere	Extendosphere
Modo	Semicontinuo	Batch	Continuo	Continuo	Continuo
Afluente	Residual diluido de jugo concentrado de naranja	Del proceso de prensado de naranja	Del proceso de prensado de naranja	Sustrato cítrico	Sustrato cítrico
Pre-tratamiento	No	Sulfato de aluminio	----	No	No
Nutrientes	Si	Si	----	Si	Si
Cva (gDQO/L*d)	0.312 – 4.175	1.5 – 5	0.51	Hasta 8	Hasta 40
TRH (d)	1 – 4	2 – 3	16	1	0.4
DQO removida (%)	77.5 – 97.2	84	----	Hasta 90	Hasta 80
Y (L <sub>CH4</sub> / gDQO rem)	0.3 – 0.381	0.297	0.238	Hasta 0.25	Hasta 0.3

El hecho de tratar estos residuos en reactores biológicos de 3° generación como los RLFY y sus posteriores evoluciones: los reactores híbridos (González – Paz., 2015) y el RLSFY como el que fue motivo de estudio en este trabajo, definitivamente permitió alcanzar diversas ventajas tanto biológicas como operativas.

El RLSFY utilizado en el presente trabajo, permitió poder alcanzar cargas de trabajo muy elevadas con este tipo de residuos, sin precedente en la literatura científica. Esto se justifica por la adecuación de las placas de semifluidizado las cuales parecen tener un gran efecto sobre la estabilidad del soporte y por ende sobre el buen desarrollo del consorcio bacteriano, el cual finalmente es el encargado de degradar la materia orgánica. Otra clara ventaja operativa se observa en el TRH manejado en el RLSFY, ya que trabajos anteriores como se observa en la Tabla 3.6, ocuparon TRH incluso hasta de 16 d, llevando consigo una claro inconveniente al momento de escalar el proceso a nivel industrial.

Durante el desarrollo experimental del presente trabajo cabe destacar que no se observó comportamiento inhibitorio por efecto del D-Limoneno, como otros autores mencionan (Valdés et al. 1993), (Martín et al. 2010) y (González – Paz, 2015). Esto fue debido a las características que presentó el RLSFY tales como la inmovilización dentro del reactor del consorcio bacteriano y las altas tasas de remoción y transferencia de masa que existió en él, debido en mayor medida al régimen semifluidizado con el que se operó el reactor.

Las máximas remociones de DQO que se lograron alcanzar con el RLSFY oscilaron entre el 75 % – 80% esto con cargas no mayores a 10 gDQO/L\*d, al aumentar la carga no se lograron remociones más allá del 55% como las reportadas por trabajos anteriores. Esto se debe al TRH con el que se operó el reactor, para cargas muy elevadas se hace necesario más tiempo de contacto entre el consorcio bacteriano y el sustrato a degradar.

La generación de biogás dentro del RLSFI pareció verse potenciada por el efecto del semifluidizado, llegando a alcanzar producciones diarias de hasta 30 L, fue aquí donde el uso de placas de semifluidizado cobro vital importancia, ya que estas permitieron mantener un control sobre el soporte y evitar que este abandonara el reactor por sobrefluidización causada por el biogás.

Dentro de la bibliografía científica no existen trabajos reportados con regímenes semifluidizados en reactores biológicos, el único precedente que existe es el trabajo de Leyva *et al.*, (1993) el cual solo se enfoca en la descripción matemática del fenómeno, pero no en una aplicación real, por lo que no existe un precedente comparativo.

El antecedente más reciente para comparar el desempeño del RLSFI es el de González – Paz., (2015), dicho trabajo aun cuando supero los resultados obtenidos por investigaciones previas como se muestra en la tabla anterior, no logra alcanzar cargas superiores a 8 gDQO/L\*d ya que reporta problemas de acidificación. Aun con esto se convirtió en el primer trabajo pionero sobre reactores de lecho fluidizado para tratar sustratos cítricos, sentando las bases para el desarrollo de esta investigación.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados observados durante el desarrollo del presente trabajo, el uso de reactores biológicos de lecho semifluidizado se presenta como una opción con grandes ventajas para tratar efluentes citrícolas. Entre estas son dignas de resaltar las grandes Cva alcanzadas, de hasta 40 gDQO/L\*d con TRH de 0.4 d y remociones de DQO del 55%.

Al momento de diseñar las placas de semifluidizado es preciso determinar bien el tamaño y tipo de abertura que estas tendrán, ya que como se observó en las pruebas de fluidización que se llevaron a cabo, orificios menores a 6 mm obstruyeron las placas de semifluidizado por la biomasa desprendida naturalmente por el soporte, deteniendo el funcionamiento del reactor. La placa de orificio circular de 6 mm, presentó muy buenos resultados ya que durante los 190 días de operación del RLSFI nunca se obstruyó. Dicha placa probó su ventaja operativa más grande, cuando el RLSFI alcanzo producciones de biogás cercanas a los 30 L/d y velocidades de biogás de 0.7 m/h, manteniendo el soporte dentro del reactor evitando su salida por sobrefluidización y por ende pérdida de materia microbiana degradante. A su vez el uso de placas de semifluidizado parece aumentar la transferencia de masa dentro del reactor y favorecer el buen desarrollo del consorcio bacteriano adherido al soporte, formando biopelículas más fuertes y de mejor tamaño, esto se comprueba por el aumento en un 100% de aumento en la cantidad de MVA adherida al soporte desde el día 1 al día 190 de operación.

El efecto del biogás en la fluidización del soporte es determinante tal como se comprobó en el monitoreo de la expansión del lecho, se logró fluidizar el soporte colonizado hasta en un 100% con velocidades de líquido menores de 0.05 m/h lo cual representa un claro ahorro energético.

El hecho de iniciar la operación de reactores biológicos con inóculos previamente colonizados representa una clara ventaja ya que permite tiempos de arranque mucho menores, el periodo de estabilización fue de 35 días, en el cual se lograron alcanzar remociones de DQO de hasta 95% y rendimientos de metano cercanos a  $0.3 \text{ L}_{\text{CH}_4} / \text{gDQO}$  removida, indicando la correcta estabilización del mismo. El cambio a sustrato cítrico provocó marcados desajustes biológicos dentro del RLSFI tales como una caída drástica en el pH, rendimiento de metano y remociones de DQO, estos fueron superados rápidamente en los siguientes 15 días, debido a la rápida aclimatación del consorcio bacteriano y a la estabilidad en general del reactor, el régimen semifluidizado parece favorecer el desarrollo de la flora bacteriana degradante esto se presume por el rápido desarrollo de biopelícula estable y comportamientos biológicos con alto rendimiento.

El uso de la semifluidización es un acercamiento novedoso para la optimización de los RLF, este trabajo demostró que se favorece marcadamente el desempeño y rendimiento en los reactores biológicos al operar en este tipo de régimen hidrodinámico.

## RECOMENDACIONES

Dentro de la bibliografía científica no existen aplicaciones usando regímenes semifluidizados por lo que todavía es ampliamente perfeccionable el desarrollo de este acercamiento, la optimización en el diseño de las placas es sin duda el punto más importante de mejora en este tipo de reactores, a su vez el material con el que estas se construyen, ya que debe tener características especiales para poder soportar la abrasión física y biológica a la que está expuesta durante su uso.

El diseño de los RLSFI puede todavía optimizarse para lograr mantener el soporte dentro del reactor, investigaciones llevadas a la par de este proyecto, sugieren utilizar reactores de lecho fluidizado multitubulares, esta nueva tecnología aunada a la semifluidización pueden ser una excelente opción para el tratamiento de residuos con alta carga orgánica, no solo cítrcolas sino de cualquier industria en general.

Para poder describir mejor el comportamiento del régimen semifluidizado se hace necesario instrumentar el RLSFI con controles electrónicos que permitan saber en todo momento los flujos y velocidades exactas tanto de biogás como del líquido, esto con el fin de eventualmente poder modelar el comportamiento del mismo y poder optimizarlo matemáticamente.

Se propone probar el desempeño del RLSFI con diversos sustratos con diferentes características fisicoquímicas, con el fin de observar el comportamiento del mismo y establecer conclusiones para futuros trabajos con diferentes efluentes distintos al cítrcola.

Implementar estrategias para mejorar la remoción de DQO a cargas elevadas, esto se sugiere hacer a través del aumento en el TRH del reactor, adición de diversos nutrientes además de los ocupados en este trabajo o algún pretratamiento.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar-Montor, Y. 2014. *Estudio integral de digestión anaerobia en dos etapas para el tratamiento de la fracción soluble de residuos sólidos orgánicos a nivel laboratorio*. Tesis de grado. Maestría en Ingeniería Química. Instituto Tecnológico de Orizaba. Mexico.
- Ajmal, M., Rao, R.A.K., Ar, A.J., 2001. *Adsorption studies on Citrus reticula (fruit peel of orange): removal and recovery of Ni(II) from electroplating wastewater*. J. Hazard. Mater. **79**, 117–131.
- Alvarado-Lassman, A., Rustrián, E., García-Alvarado, M. A., Rodríguez-Jiménez, G. C., and Houbron, E. (2008). *Brewery wastewater treatment using anaerobic inverse fluidized bed reactors*. Bioresource technology, **99**(8): 3009-3015.
- Alvarado-Lassman, A., Sandoval-Ramos, A., Flores-Altamirano, M. G., Vallejo-Cantú, N. A., and Méndez-Contreras, J. M. (2010). *Strategies for the startup of methanogenic inverse fluidized-bed reactors using colonized particles*. Water Environment Research, **82**(5): 387-391.
- Antonio-Quaia, E. 2011. *Reducción de la carga orgánica de las aguas de lavado de cáscara del limón por fermentación con levaduras y obtención del alcohol etílico*. Tesis de grado. Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad Tecnológica Nacional. Argentina.
- Buffière, P., Bergeon, J. P., and Moletta, R. (2000). *The inverse turbulent bed: a novel bioreactor for anaerobic treatment*. Water Research, **34**(2): 673-677.
- Cancalon, P. F. (1994). *Changes in the saccharide composition of citrus juice and anatomical fractions during fruit maturation*. In *proceedings-Florida state horticultural society* (Vol. 107, pp. 253-253). Florida state horticultural society.
- Cerón–Salazar, I y Cardona–Alzate, C (2011). *Evaluación del proceso integral para la obtención de aceite esencial y pectina a partir de la cáscara de naranja*. Ingeniería y Ciencia, ISSN, **7**(13), 65-86
- Consejo Citrícola Mexicano. 2007. *Informe de la industria mexicana de naranja fresca*, México.

- Consejo Citrícola Veracruzano. [http:// www.concitver.com/15\\_1citricultura](http://www.concitver.com/15_1citricultura)
- [http://www.concitver.com/15\\_1citricultura.html](http://www.concitver.com/15_1citricultura.html) Consulta realizada en Septiembre 2014
- Corazza, M.L., Rodríguez, D.G., Nozaki, J., 2001. *Preparação e caracterização do vinho de laranja*. Quim. Nova **24**, 449–452.
- Davies, F. S., and Albrigo, L. G. (1999). *Citrus*. Acribia, Editorial Acribia, S.A. Zaragoza, España.
- Díaz-Camino, 2010. *Naranja Dulce, Limón Partido*. Claridades Agropecuarias, **197**: (32-39).
- Dirección General de Planeación Estratégica y Análisis Sectorial de México. 2010. *Monografía del jugo de naranja*, México.
- Donsì, F., Annunziata, M., Sessa, M., Ferrari, G., 2011. *Nanoencapsulation of essential oils to enhance their antimicrobial activity in foods*. LWT-Food Sci. Technol. **44**, 1908–1914.
- Ferrer, Y. y Pérez, H. (2010). *Los microorganismos en la digestión anaerobia y la producción de biogás*. ICIDCA, **43**(1): 9-20
- García-Calderón, D., Buffiere, P., Moletta, R., and Elmaleh, S. (1998). *Anaerobic digestion of wine distillery wastewater in down-flow fluidized bed*. Water Research, **32**(12): 3593-3600.
- Gerardi, M. H. (2003). *The microbiology of anaerobic digesters*. John Wiley & Sons.
- Gobierno del Estado de Veracruz - Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria (CVCA). 2002. *Diagnóstico de la cadena de naranja en el estado de Veracruz*, México.
- González-Paz, R. (2015) *Tratamiento anaerobio del efluente proveniente del proceso de una industria citrícola en un reactor híbrido*. Tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Orizaba. México.
- Gómez-Cruz, M. A., and Schwentesius Rindermann, R. (1997). *Agroindustria de naranja en México*. Centro de Investigaciones

Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial (CIESTAAM) de la Universidad Autónoma Chapingo. 2007. México

- Hidalgo, M.D. and García, P.A. (2012) Reactores Biológicos de Lecho Fluidizado. Universidad de Valladolid. España
- Kaparaju, P. L. N., and Rintala, J. A. (2006). *Thermophilic anaerobic digestion of industrial orange waste*. Environmental technology, **27**(6), 623-633.
- Koppar, A., and Pullammanappallil, P. (2013). *Anaerobic digestion of peel waste and wastewater for on site energy generation in a citrus processing facility*. Energy, **60**: 62-68.
- Leyva R, Soriano P, Serrato V. 1993. *Hidrodinámica de un lecho semifluidizado líquido – sólido*. Tecnología, Ciencia y educación. **9**: 23-31.
- Levin, M. A., and Gealt, M. A. (1997). *Biotratamiento de residuos tóxicos y peligrosos: selección, estimación, modificación de microorganismos y aplicaciones*. McGraw-Hill.
- López-Velázquez, M. A., Santes, V., Balmaseda, J., and Torres - García, E. (2013). *Pyrolysis of orange waste: a thermo-kinetic study*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, **99**: 170-177.
- Mata-Álvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M. S., Fonoll, X., Peces, M., and Astals, S. (2014). *A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, **36**: 412-427.
- Martín, M. A., Siles, J. A., Chica, A. F., and Martín, A. (2010). *Biomethanization of orange peel waste*. Bioresource technology, **101**(23), 8993-8999.
- Migliavaca, J., (2011) *Tratamiento anaerobio de efluentes cítricos con captación de biogás para la reducción de gases de efecto invernadero*. Tesis de maestría, Universidad de Tucuman. Argentina.
- Rezzadori, K., Benedetti, S., and Amante, E. R. (2012). *Proposals for the residues recovery: Orange waste as raw material for new products*. Food and bioproducts processing, **90**(4): 606-614.

- Secretaria de Hacienda y Crédito Público (SHCP). 2014. *Panorama de la naranja*, México.
- SIAP-SAGARPA <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/> Consulta realizada en Septiembre 2014
- Sowmeyan, R., and Swaminathan, G. (2008). *Evaluation of inverse anaerobic fluidized bed reactor for treating high strength organic wastewater*. *Bioresource technology*, **99**(9): 3877-3880.
- Stoodley, P., Sauer, K., Davies, D. G., and Costerton, J. W. (2002). *Biofilms as complex differentiated communities*. *Annual Reviews in Microbiology*, **56**(1): 187-209.
- Tienne, L., Deschamps, M.C., Andrade, A.M., 2004. *Produção de carvão e subprodutos da pirólise da casca e do bagaço de la ranja (Citrus sinensis)*. *Biomassa Energia* **1**,191–197.
- Tripodo, M. M., Lanuzza, F., Micali, G., Coppolino, R., and Nucita, F. (2004). *Citrus waste recovery: a new environmentally friendly procedure to obtain animal feed*. *Bioresource Technology*, **91**(2): 111-115.
- Vaccari D., Strom F., Alleman J. (2006). *Environmental biology for engineers and scientists*. Canada: Wiley-Interscience
- Van Heerden, I., Cronjé, C., Swart, S. H., & Kotzé, J. M. (2002). *Microbial, chemical and physical aspects of citrus waste composting*. *Bioresource Technology*, **81**(1): 71-76.
- Valdes, P., Guerrero, B., Nieves, G., De la Torre, V. (1993) *Tratamiento de aguas residuales cítricas por vía anaerobia*. *Revista Internacional de contaminación ambiental*, **10**(2), 69-75
- Widmer, W., Zhou, W., Grohmann, K., 2010. *Pretreatment effects on orange processing waste for making ethanol by simultaneous saccharification and fermentation*. *Bioresource Technology*. **101**, 5242–5249.
- Wilkins, M.R., Suryawati, L., Maness, N.O., Chrz, D., 2007a. *Ethanol production by Saccharomyces cerevisiae and Kluyveromyces marxianus in the presence of orange-peel oil*. *World J. Microbiol. Biotechnol.* **23**, 1161–1168.

- Zhang, H., Zhu, J. X., and Bergougnou, M. A. (1999). *Hydrodynamics in downflow fluidized beds (1): solids concentration profiles and pressure gradient distributions*. *Chemical Engineering Science*, **54**(22): 5461-5470.