



**UADY**  
UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA  
DE YUCATÁN

**SEMINARIO PERMANENTE DE INVESTIGACIÓN FIQ**

**MESA PANEL BIORREFINERIAS**

**“Aprovechamiento integral de lodos residuales en la generación de hidrocarbones con hierro y su aplicación en la generación de biogás”**

**Dr. Juan Enrique Ruiz Espinoza**

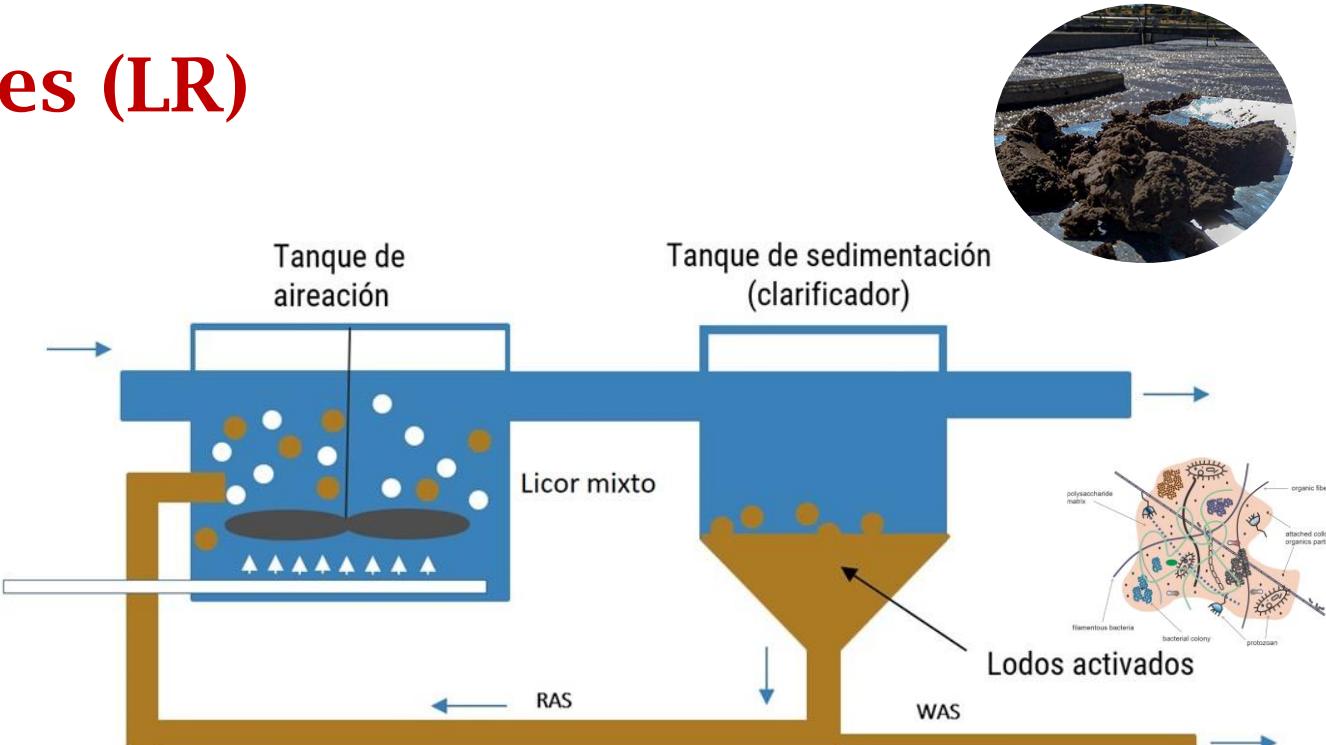
**Abril, 2025**

**Facultad de Ingeniería Química**



## Generación de lodos residuales (LR)

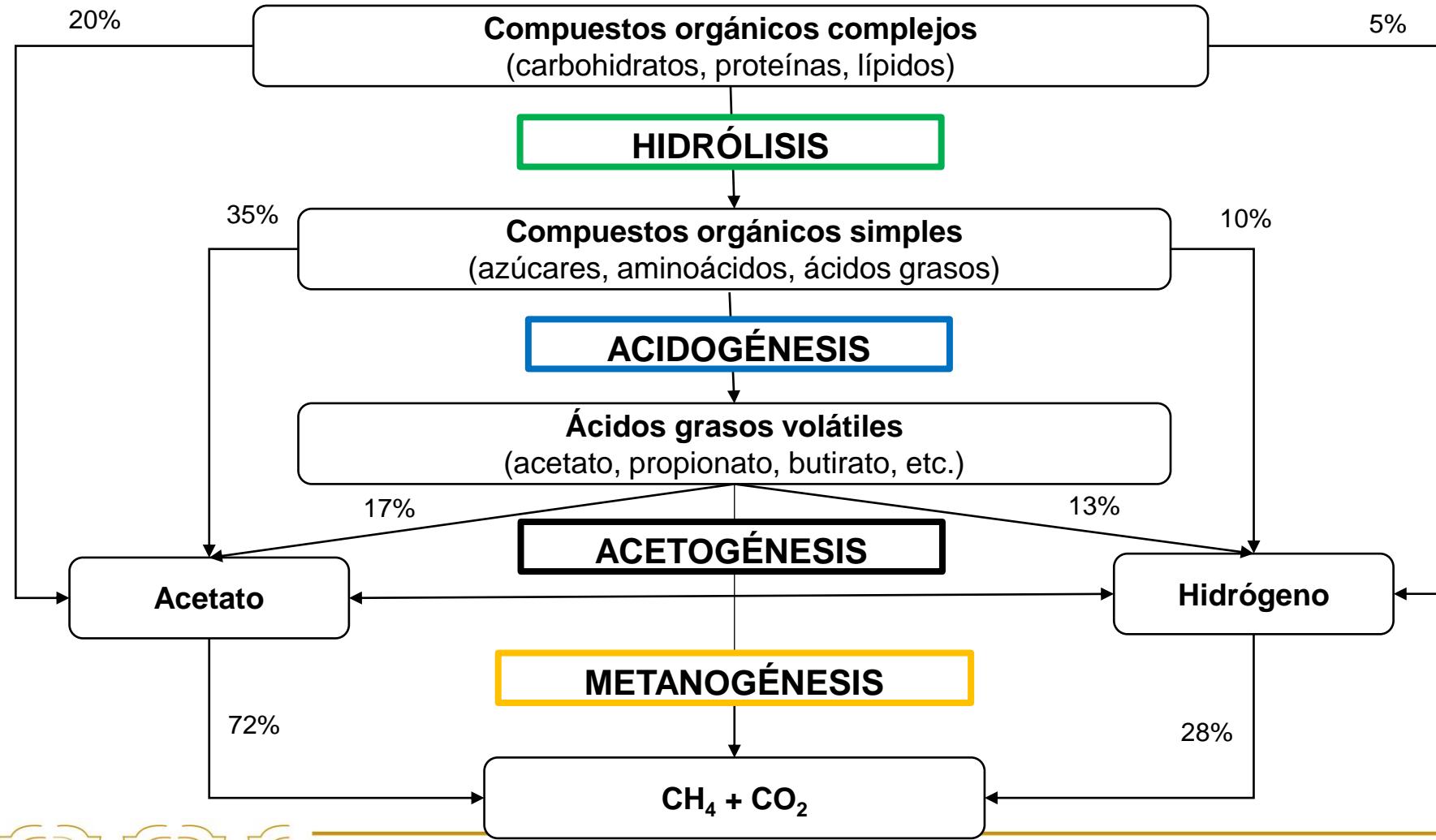
- Los LR son producto del tratamiento de aguas residuales.
- El crecimiento excesivo de los microorganismos forma lodo biológico.
- Tienen alto contenido de materia orgánica, metales pesados, macro y microelementos.
- En Yucatán se estima que la producción anual supera las 118,649 toneladas de lodos (secos) al año de 26 plantas de tratamiento de aguas residuales.
- Se estima una producción mundial anual de lodos residuales de 45 millones de toneladas secas.



**Figura 1.** Proceso de lodos activados.

Fuente: <https://cropaia.com>

# DIGESTIÓN ANAEROBIA



## Limitaciones

- **Hidrólisis limitada**
- **Bajos rendimientos de biogás**
- **Altos TRH**
- **Inestabilidad a altas cargas**
- **Inhibición**

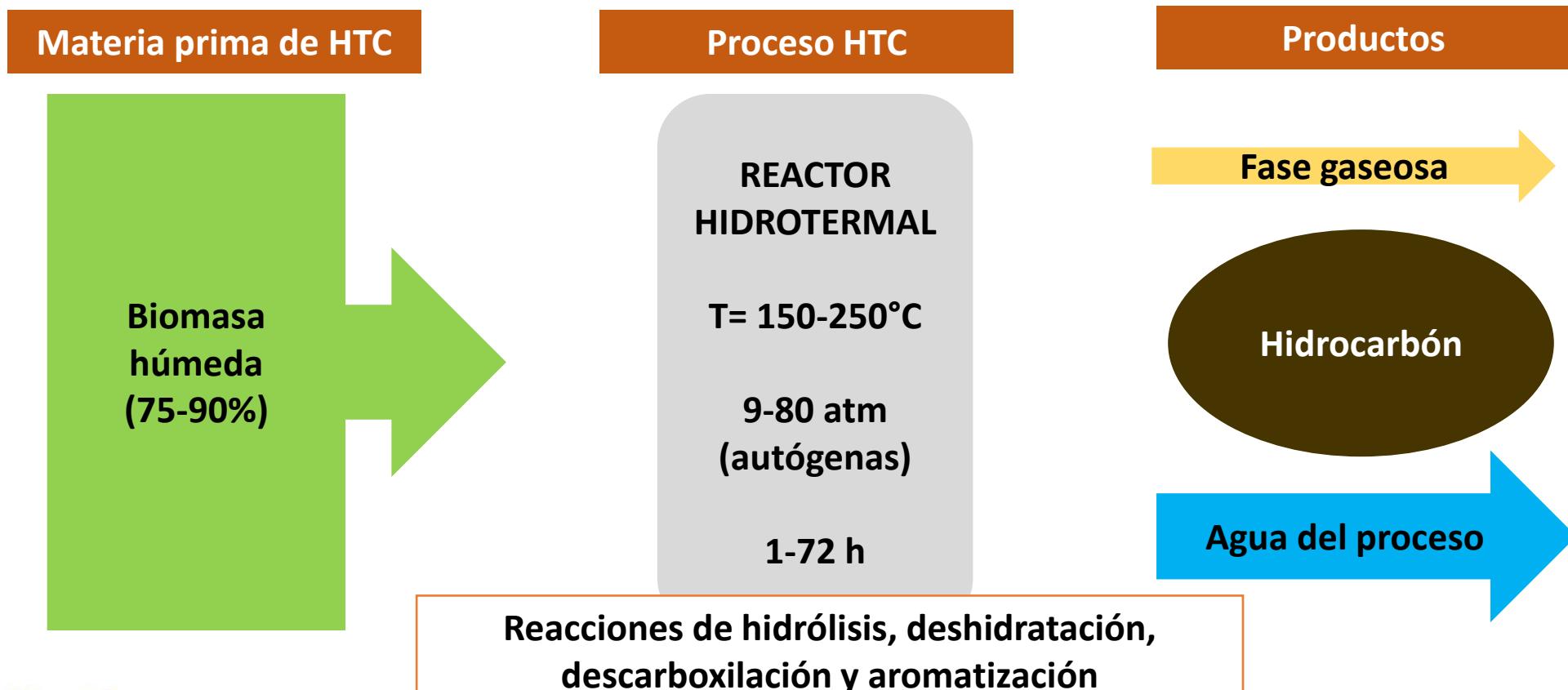
Fuente: AINIA (2015)

Figura 2. Etapas de la digestión anaerobia.

# CARBONIZACIÓN HIDROTERMAL

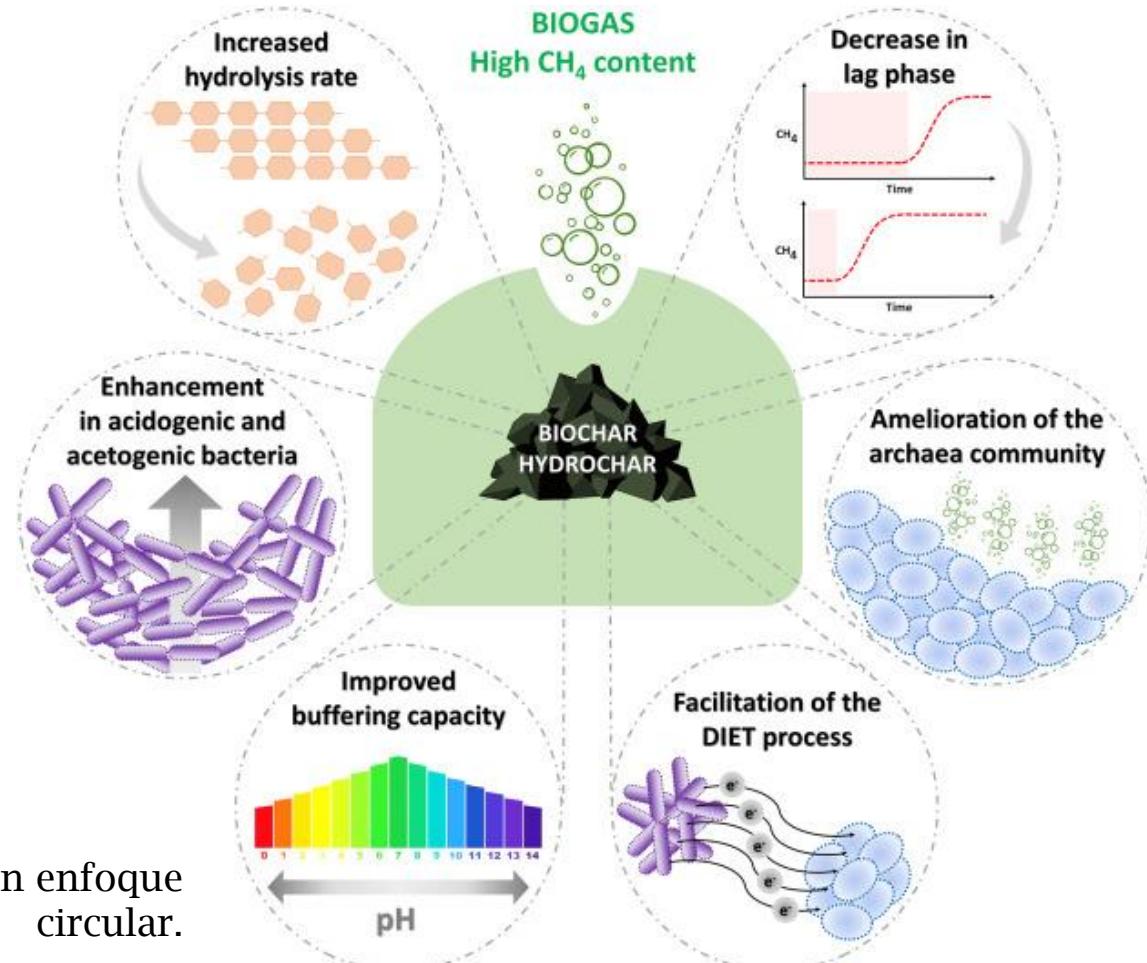


- Proceso que transforma biomasa en un producto principalmente carbonoso, denominado **hidrocarbón** (*hydrochar*).



# HIDROCARBONES MODIFICADOS CON HIERRO

- El Fe° puede mejorar la producción de metano, mejorar la transferir electrones directamente en la DA. **Lizama et al., 2019**
- El estudio del hidrocarbón modificado con hierro (HC-Fe) está avanzado en diversas áreas, incluyendo su síntesis, caracterización y remediación ambiental.
- Wang et al. (2020) encontraron que el HC-Fe puede reducir la concentración de metales pesados y patógenos potenciales en la DA.



**Figura 4.** HC en la DA para un enfoque circular.



## Síntesis de HC-Fe

Se llevó a cabo en un reactor de acero inoxidable con presión autogenerada y con capacidad de 200 mL. El LR crudo se sometió a un proceso de HTC a 150 °C durante 15 horas.

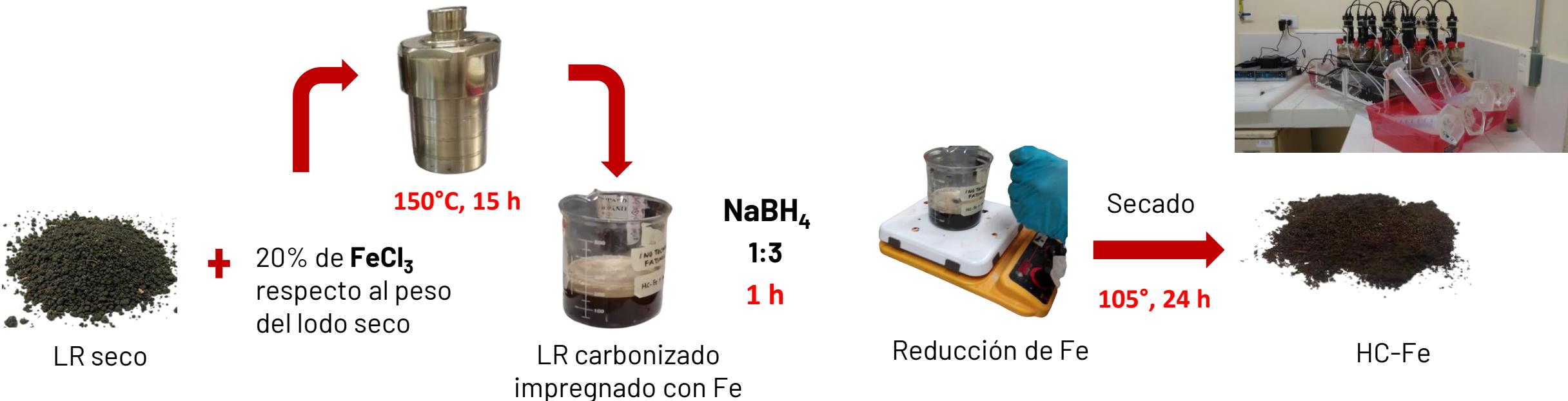


Figura 5. Procedimiento para la síntesis de HC-Fe.



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN



# CARACTERIZACIÓN DE HC y HC-FE



La síntesis fue llevada a cabo con  $\text{FeCl}_3 \bullet 6\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{NaBH}_4$ , este experimento representa un enfoque para la fabricación de nanomateriales, siendo la reacción de reducción química la metodología más ampliamente adoptada para este propósito.

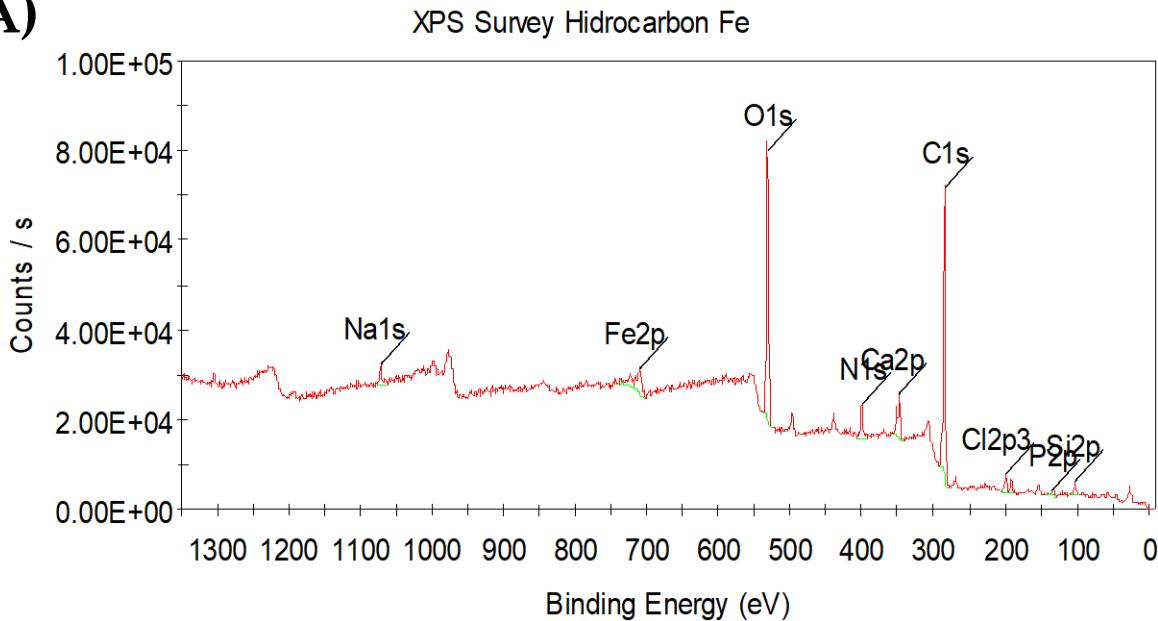


**Figura 6.** Propiedad combinacional: estructura núcleo-capa.



## Análisis de espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS)

A)



B)

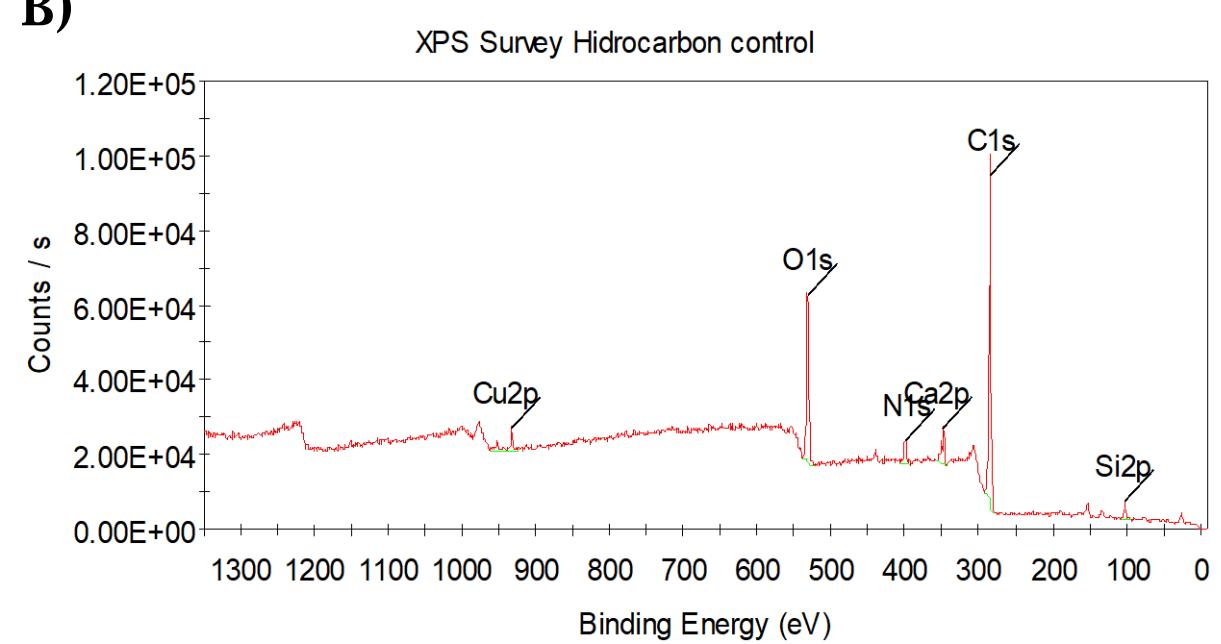
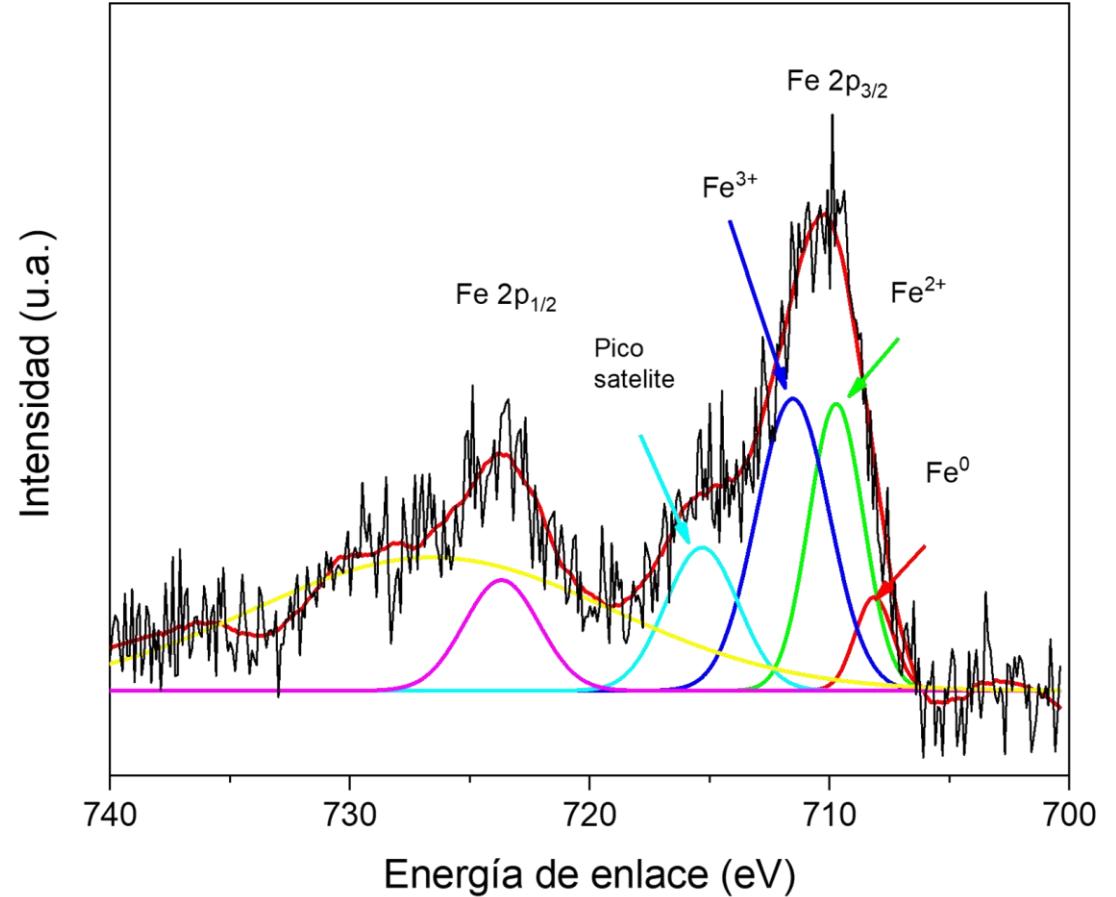


Figura 6. Barridos XPS A) HC-Fe. B) HC



- Se encontró que coexistían diversos tipos de hierro,  $\text{Fe}^{\circ}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Fe}^{+3}$ .
- Los picos a 706.8 eV indicaron la presencia de ZVI.
- Los picos intensos corresponden a las energías de unión 2p<sub>3/2</sub> de  $\text{Fe}/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe(OH)O}$  y a las energías de unión 2p<sub>1/2</sub> de los compuestos  $\text{FeOOH}/\text{Fe}_2\text{O}_3$  respectivamente



**Figura 7.** Deconvolución Fe 2p de HC-Fe.



## Análisis MP-AES

- Se reveló que en 50 g de HC, se impregnaron **1023.75 mg Fe**.
- Representa un **9.91%** de la base seca del lodo.
- Se obtuvo que el rendimiento sólido del HC y HC-Fe fueron de **79.56% y 83.80%**, respectivamente.

**Tabla 1.** Dosis de hidrocarbones modificados con hierro y hierro..

<b>Dosis de HC.Fe (g/gSV)</b>	<b>Dosis de Fe (mg/gSV)</b>
1	20.47
3	61.42
5	102.37



# PRODUCCIÓN DE BIOGÁS CON LA ADICIÓN DE HC Y HC-FE

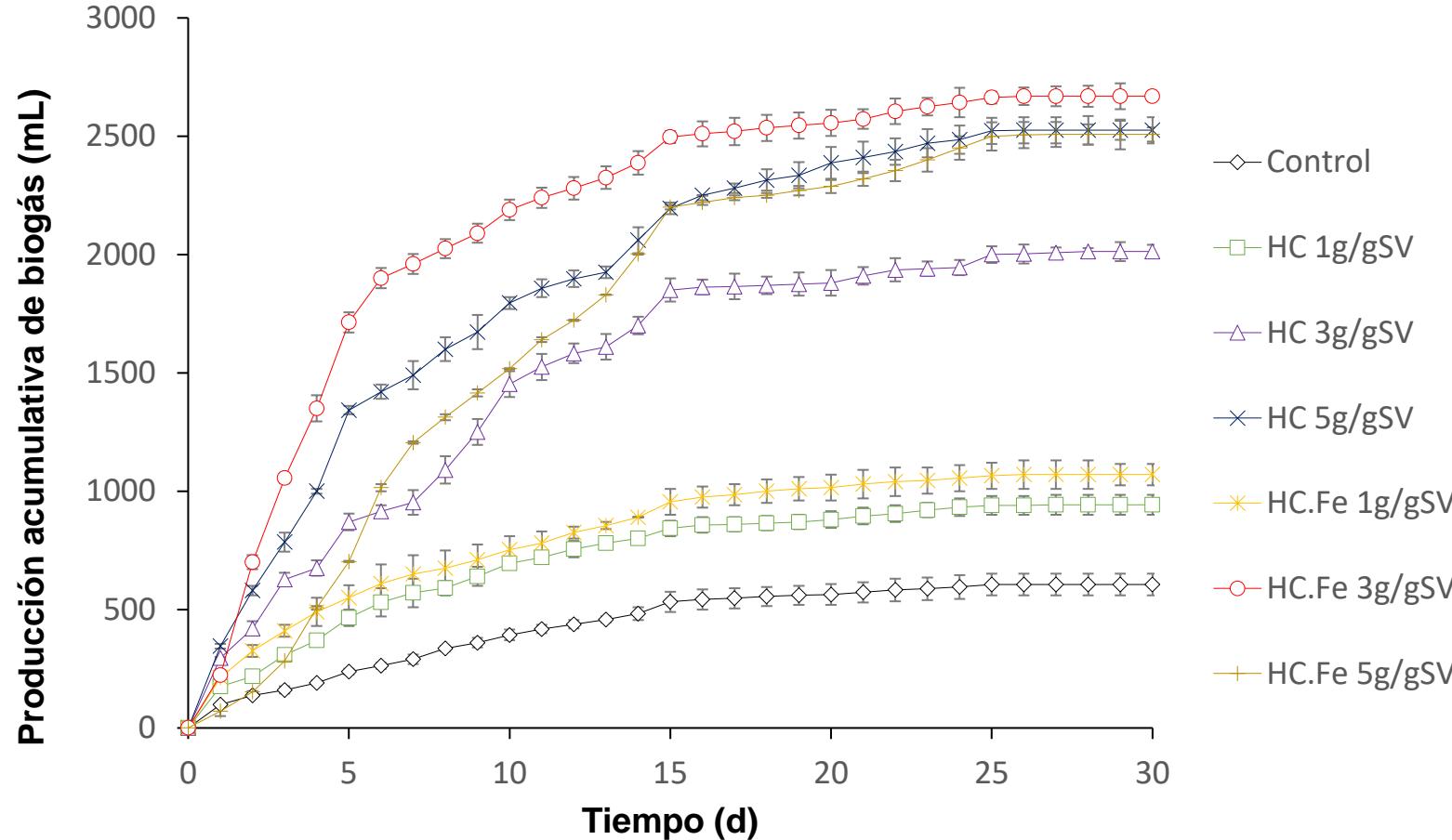


Figura 8. Biogás acumulativo de la DA de LR con la adición de HC y HC-Fe.

- La producción acumulada de biogás más alta para HC fue de 2525 mL y para la dosis HC-Fe 3 g/gSV fue de 2668.8 mL.
- Se obtuvo una producción de 2507.5 mL de biogás para la dosis 5g/gSV de HC-Fe, representando un valor **menor** a lo esperado.

# RENDIMIENTO DEL METANO CON ADICIÓN DE HC Y HC-FE



**Tabla 2.** Producción de biogás y metano con la adición de HC y HC-Fe.

Dosis (g/gSV)	Biogás acumulativo (mL)	Contenido de metano (%)	Incremento de biogás (%)	Incremento de metano (%)	Rendimiento de biogás (mL biogás/gSV <sub>rem*</sub> )	Rendimiento de metano (mL CH <sub>4</sub> /gSV <sub>rem*</sub> )
0	606 ± 46	55.87	-	-	112.30	63.28
1 HC	942.5 ± 42	57.14	55.53	2.26	164.10	93.76
1 HC-Fe	1070 ± 45	58.89	76.57	5.39	210.07	123.70
3 HC	2012.5 ± 28	63.50	232.10	13.65	243.46	167.06
<b>3 HC-Fe</b>	<b>2668.5 ± 21</b>	<b>79.95</b>	<b>340.35</b>	<b>43.10</b>	<b>266.74</b>	<b>213.19</b>
<b>5 HC</b>	<b>2525 ± 55</b>	<b>77.65</b>	<b>316.67</b>	<b>38.98</b>	<b>176.80</b>	<b>137.29</b>
5 HC-Fe	2507.5 ± 30	64.95	313.78	16.24	281.36	188.51

\*gSV<sub>rem</sub>: sólidos volátiles removidos.

# EFECTO DE HC Y HC-FE SOBRE LA ETS-INT



- El valor promedio en el control fue de **31.88 µg INT<sub>red</sub> / mg d.**
- El valor promedio de HC 5g/gSV fue de **85.42 µg INT<sub>red</sub> / mg d.**
- El valor promedio de HC-Fe 5g/gSV fue de **54.63 µg INT<sub>red</sub> / mg d.**

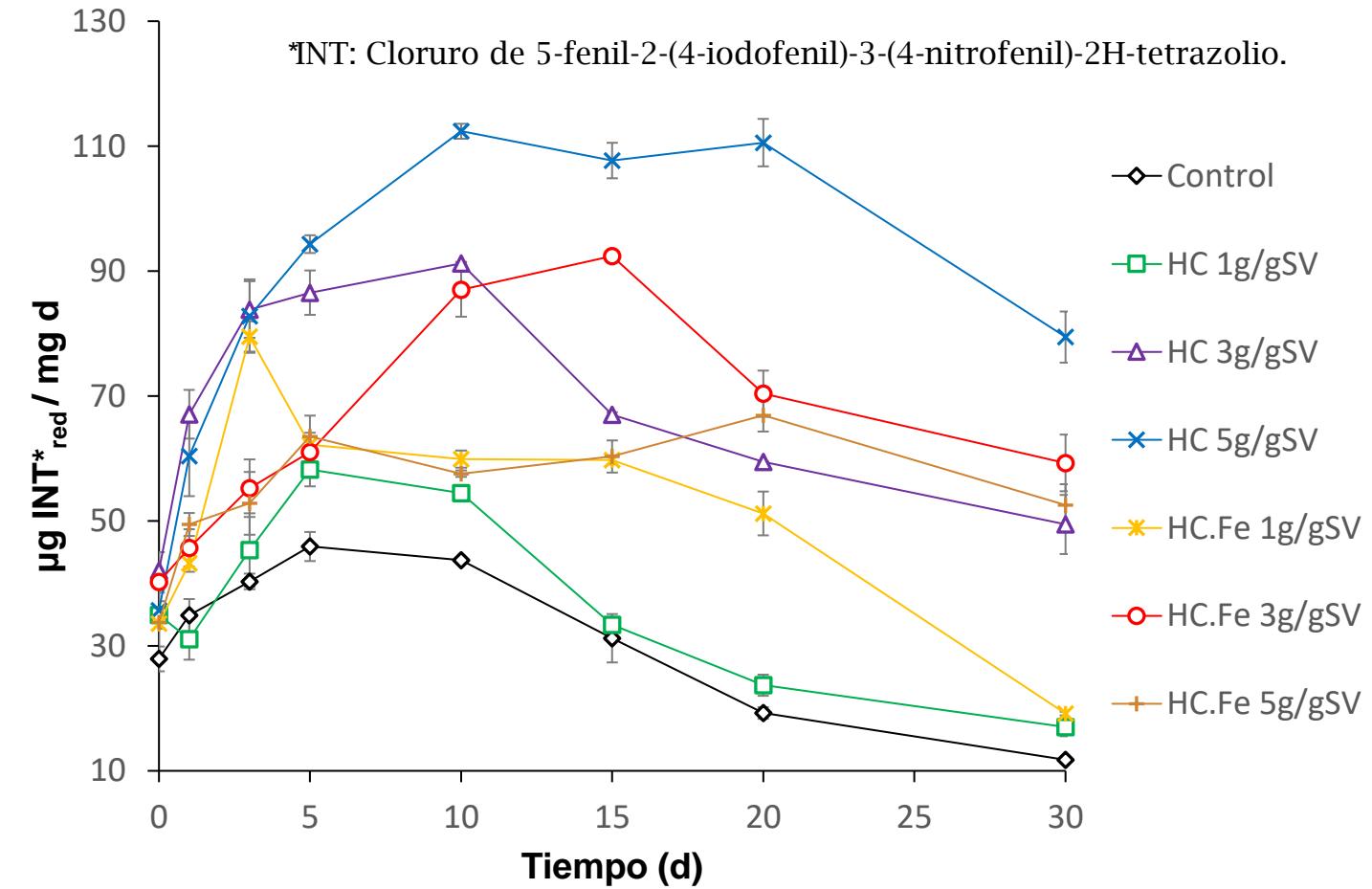
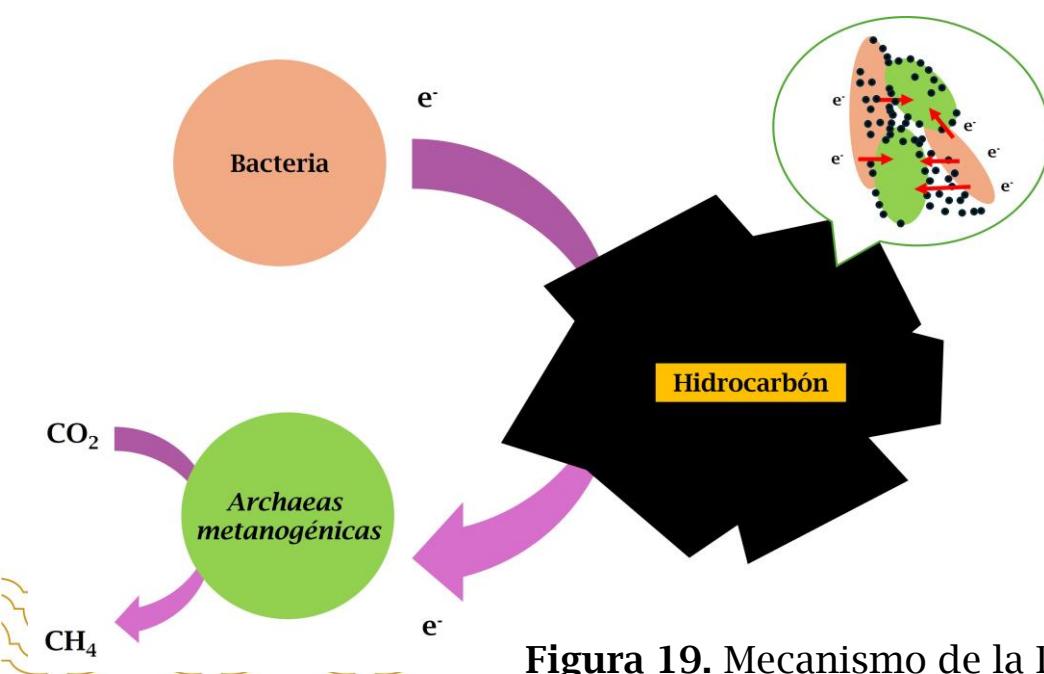
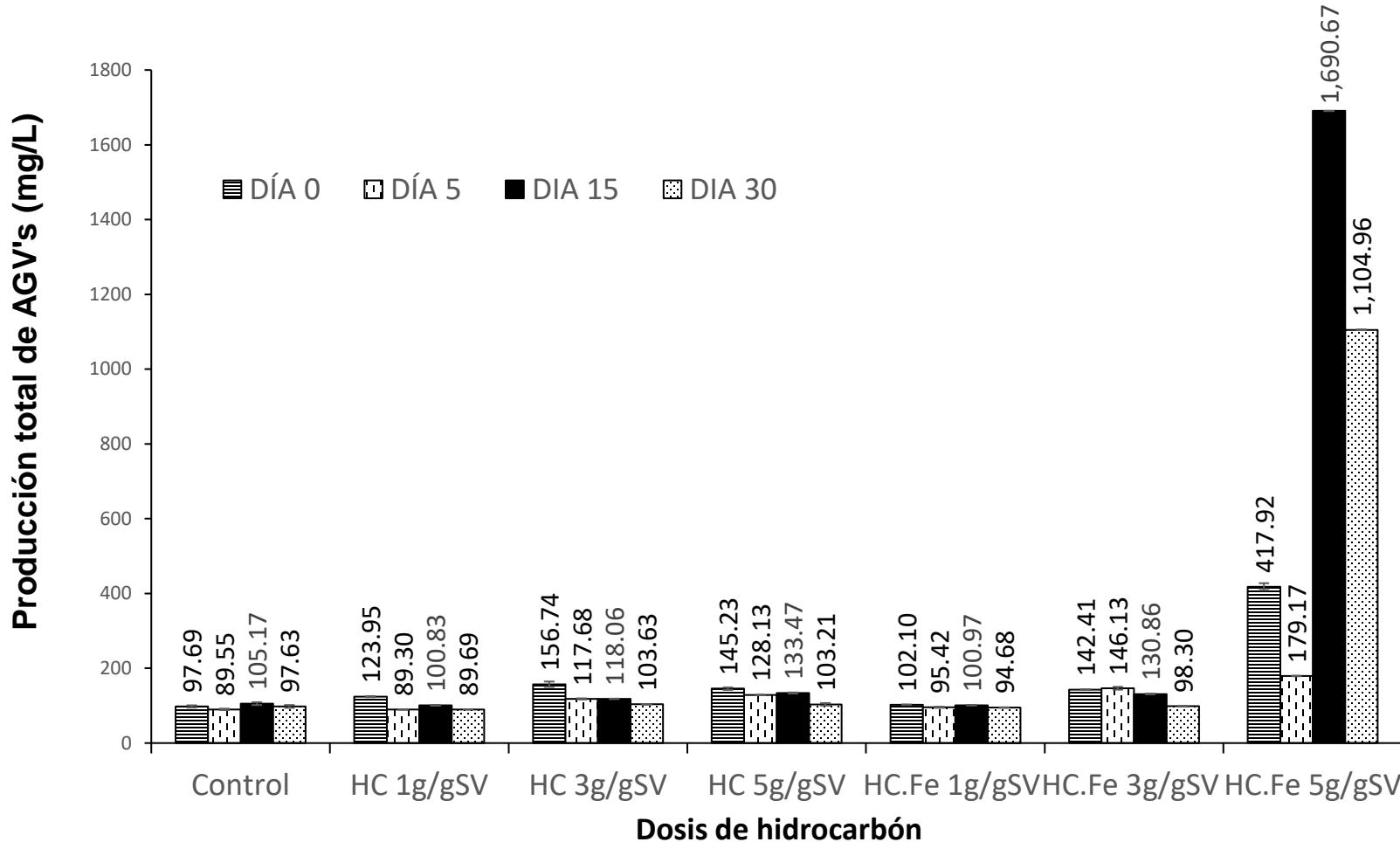


Figura 19. Cambios del ETS con la adición de HC y HC-Fe.

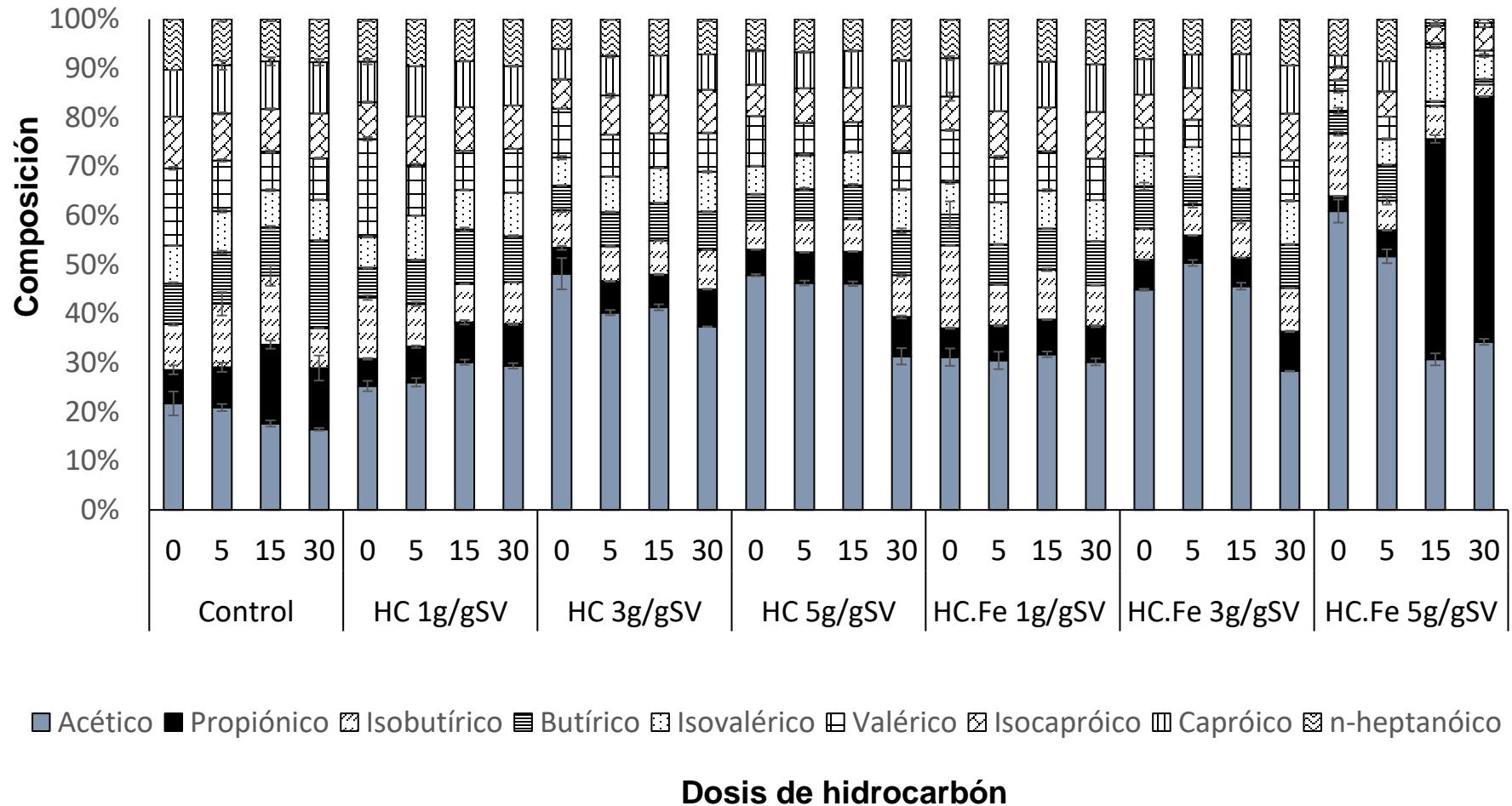
Figura 19. Mecanismo de la DIET con adición de HC y HC-Fe.

# EFECTO DE HC Y HC-FE SOBRE LOS AGV



- A medida que disminuye la concentración de AGV, se va produciendo un incremento en el volumen de metano obtenido.
- La dosis HC.Fe 5 g/gSV tuvo una acumulación de **1,690.67 mg/L**, lo que coincide con el rango de pH más bajo (6.9 – 7.5)

Figura 22. Concentración total de AGVT con la adición de HC y HC.Fe.



- La concentración de ácido propiónico de HC-Fe 5g/gSV incrementó significativamente a partir del día 15 (**759.62 mg/L**) y para el día 30 logró disminuir (**552.63 mg/L**).
- Con esto, se puede explicar el contenido bajo de metano (**64.95%**).

Figura 23. Composición de AGV's con la adición de HC y HC.Fe.

# EFECTO DE HC Y HC-FE EN LA REMOCIÓN DE SOLIDOS VOLÁTILES



Tabla 3. Reducción de SV con la adición de HC y HC-Fe.

Dosis (g/gSV)	Reducción SV (%)
0	27.12
1 HC	19.94
1 HC.Fe	28.41
<b>3 HC</b>	<b>59.82</b>
<b>3 HC.Fe</b>	<b>51.17</b>
5 HC	44.63
5 HC.Fe	44.41

- Las dosis HC 3g/gSV y HC.Fe 3 g/gSV alcanzaron las reducciones máximas, siendo **2.20 y 1.88 veces mayor** que el control.
- El efecto de HC y HC-Fe fue estimulante para la DA.
- Méndez J. reporta una reducción máxima de 38% en la DA de lodos residuales en condiciones mesofílicas y sin algún tipo de aditivo.
- Juntupally et. al. obtuvieron una reducción del 71% en la DA de estiércol de ganado usando nanopartículas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  con dosis de 12.5 mg/L.



*"Luz, Ciencia y Verdad"*

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

DIRECCIÓN GENERAL DE DESARROLLO ACADÉMICO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

Campus de Ciencias Exactas e Ingenierías

FACULTAD DE QUÍMICA

Campus de Ciencias de la Salud

**"Estudio de hidrocarbones modificados con óxidos de hierro  
en el mejoramiento de la digestión anaerobia de lodos  
crudos"**

Tesis presentada por

Fátima Jacqueline González Nahuat

En opción al título de

Licenciada en Química Aplicada

Director de tesis

Dr. Juan Enrique Ruiz Espinoza

Dr. Cristian Carrera Figueiras





**GRACIAS POR SU ATENCIÓN**