



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA

PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LOS FILTRADOS GENERADOS EN LA EXTRACCIÓN DE FIBRA DE NOPAL

TESIS

Para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

Presentado por:

I.Q. JOSÉ MARTÍN AGUILAR AGUILAR

DIRECTOR DE TESIS

Dr. JOSÉ APOLINAR CORTÉS

CO-DIRECTORA

Dra. MA. DEL CARMEN CHÁVEZ PARGA

OCTUBRE 2021

MORELIA, MICHOACAN

DEDICATORIA

Dedicó este trabajo a mi esposa Felipa Milagros, quien me ha brindado todo su apoyo a lo largo de este proyecto, estando en los momentos más difíciles brindándome la fuerza requerida para seguir adelante y nunca redimirme, es por ello que quiero compartir este logro contigo.

A mis padres y hermanos por darme esa confianza y apoyo para lograr una meta más en mi vida profesional, el cual lo quiero compartir con ellos.

Tabla de contenido

RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
Lista de Figuras.....	3
Lista de tablas	4
Glosario.....	6
Agradecimientos	7
1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. Generalidades	9
2. MARCO TEÓRICO	12
2.1. Nopal.	13
2.1.1. Características del nopal	13
2.1.2. Producción de nopal	14
2.1.3. Composición química del nopal	14
2.1.4. Edad del nopal y contenido de fibra	15
2.2. Proceso de recuperación de fibra de nopal.....	15
2.3. Pretratamientos.....	17
2.3.1. Pretratamiento químico.....	18
2.3.2. Pretratamiento térmico.....	18
2.3.3. Pretratamiento de Concentración	19
2.4. Anaerobiosis	19
2.5. Factores en el proceso anaerobio	23
2.5.1. Relación carbono/nitrógeno	23
2.5.2. Temperatura	24
2.5.3. pH.....	24
2.5.4. Alcalinidad.....	25
2.5.5. Relación AGV'S/ Alcalinidad.....	25
2.5.6. Toxicidad	26
2.6. Potencial bioquímico de producción de metano (BMP)	28
2.7. Diseños experimentales	29
2.8. Antecedentes.....	30

2.9. Justificación	32
2.10. Planteamiento del Problema	33
2.11. Hipótesis	33
2.12. Objetivos.....	33
2.12.1. Objetivo General.....	33
2.12.2. Objetivos Específicos	34
3. METODOLOGÍA.....	35
3.1. Caracterización	36
3.1.1. Ubicación Experimental	36
3.1.2. Sustrato e Inóculo.....	36
3.2. Diseños experimentales	37
3.3. Pruebas BMP	39
3.4. Caracterización del biogás.....	39
3.6. Diagrama de Flujo Lógico de la Investigación	40
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
4.1. Caracterización del sustrato e inóculo	42
4.1.1. Caracterización del sustrato	42
4.1.2. Caracterización del inóculo.	43
4.2 Pretratamientos.....	45
4.3. Caracterización inicial de la mezcla inóculo-sustrato	46
4.4. Prueba BMP	47
4.5. Caracterización final de la mezcla inóculo-sustrato	48
4.6. Producción de biogás.....	50
4.7. Composición del biogás.....	52
4.8. Producción de metano.	55
4.9. pH	57
4.10. Conductividad.	59
4.11. Alcalinidad.....	61
4.12. Ácidos Grasos Volátiles (AGV's)	63
4.13. Demanda química de Oxígeno (DQO)	65
4.14. Sólidos Totales (ST).....	68
4.15. Sólidos Volátiles Totales (SVT).....	70

4.16. Rendimientos	72
4.17. Análisis estadístico del diseño experimental	73
4.17.1. Respuesta para las relaciones de señal a ruido	73
4.17.2. Efectos principales para las relaciones S/N	74
4.17.3. Respuestas para medias	76
4.17.4. Interacción para medias	78
4.17.5. Análisis Fisher	80
4.17.6. Prueba t	80
4.18. Análisis del agente a utilizar.	82
4.19. Balance general.....	83
5. CONCLUSIONES	85
6. RECOMENDACIONES.....	87
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
8. ANEXO	100
Anexo 1. Calculo de los balances de materia.....	101
Anexo 2. Cálculos de los rendimientos de producción de metano.	102
Anexo 3. Caracterización de biogás.....	104
Anexo 4. Balance de materia de acuerdo con las condiciones encontradas en la prueba BMP.....	105

RESUMEN

Producción de biogás a partir de los filtrados generados en la extracción de la fibra de nopal

José Martín Aguilar Aguilar

Octubre 2021

Dirigida por: Dr. José Apolinar Cortés

Codirigida por: Dra. Ma del Carmen Chávez Parga

Durante el proceso de extracción de la fibra de nopal se genera el producto principal que se denomina torta húmeda (fibra insoluble), que es alimentada a procesos posteriores de secado, molienda y empaquetado. Este proceso de extracción de fibra de nopal genera un residuo líquido que se denominan filtrados, dicho residuo está compuesto principalmente de agua, fibra soluble, mucilago, clorofila y otros compuestos en menor proporción, los cuales son desechados sin un tratamiento previo generando problemas de contaminación debido a su carga orgánica. Dada esta problemática, en esta investigación se propone el aprovechamiento de estos filtrados en los procesos de digestión anaerobia para la producción de biogás con un contenido de metano mayor al 60%, para ello se implementaron pretratamientos combinados a los filtrados generados en la extracción de fibra de nopal: Pretratamiento químico con ajuste de pH en valores de 6.5 y 8.5 con dos diferentes agentes químicos hidróxido de sodio (NaOH) y óxido de calcio (CaO), así como el pretratamiento de concentración con el ajuste de la demanda química de oxígeno (DQO) en valores de 10,000 mg DQO/L y 20,000 mg DQO/L. Posteriormente, a partir de dos diseños de experimentos Taguchi L_4 para hidróxido de sodio y óxido de calcio, respectivamente, se obtuvieron las combinaciones de pretratamientos para 4 pruebas, las cuales se realizaron por duplicado teniendo dos testigos los cuales fueron inóculo e inóculo con filtrados sin pretratar a partir de la prueba de potencial bioquímico de metano (BMP), realizando un seguimiento en la producción de biogás diariamente durante 62 días, encontrando que la prueba que tuvo mayor producción de metano y mejores rendimientos en los diseños Taguchi L_4 para hidróxido de sodio y óxido de calcio se obtuvo para la prueba donde los filtrados se ajustaron a un pH de 8.5 y a una concentración de 20,000 mg DQO/L; teniendo una producción de metano de 3104 mL y 3134 mL, una composición de metano en el biogás producido del 63.4% y 64.6% así como rendimientos de 131.4 mL CH_4 /g DQO consumido y 127.8 mL CH_4 /g DQO consumido, respectivamente. A partir de los resultados obtenidos se pueden tener las mejores condiciones para la producción de metano en un proceso de digestión anaerobia a escala planta piloto.

Palabras Claves: Filtrados, Pretratamientos, Agentes químicos, Metano, BMP.

ABSTRACT

Production of biogas from the filtrates generated in the extraction of the nopal fiber

José Martín Aguilar Aguilar

October 2021

Directed by: Dr. José Apolinar Cortés

Co-directed by: Dra. Ma del Carmen Chávez Parga

During the nopal fiber extraction process, the main product called wet cake (insoluble fiber) is generated, which is fed to subsequent drying, grinding and packaging processes. This process of extraction of cactus fiber generates a liquid residue that is called filtered, said residue is composed mainly of water, soluble fiber, mucilage, chlorophyll and other compounds in a smaller proportion, which are discarded without a previous treatment generating contamination problems. due to its organic load. Given this problem, this research proposes the use of these filtrates in the anaerobic digestion processes for the production of biogas with a methane content greater than 60%, for this, pretreatments combined with the filtrates generated in the fiber extraction were implemented. of nopal: Chemical pretreatment with pH adjustment in values of 6.5 and 8.5 with two different chemical agents sodium hydroxide (NaOH) and calcium oxide (CaO), as well as concentration pretreatment with adjustment of the chemical oxygen demand (COD) in values of 10,000 mg COD / L and 20,000 mg COD / L. Subsequently, from two Taguchi L4 experiment designs for sodium hydroxide and calcium oxide, respectively, the combinations of pretreatments for 4 tests were obtained, which were carried out in duplicate, having two controls which were inoculum and inoculum with filtrates without pretreat from the biochemical methane potential (BMP) test, monitoring biogas production daily for 62 days, finding that the test that had the highest methane production and best yields in the Taguchi L4 designs for sodium hydroxide and calcium oxide was obtained for the test where the filtrates were adjusted to a pH of 8.5 and a concentration of 20,000 mg COD / L; having a methane production of 3104 mL and 3134 mL, a methane composition in the biogas produced of 63.4% and 64.6% as well as yields of 131.4 mL CH₄ / g COD consumed and 127.8 mL CH₄ / g COD consumed, respectively. From the results obtained, the best conditions for methane production can be obtained in an anaerobic digestion process at a pilot plant scale.

Key Words: Filters, Pretreatments, Chemical Agents, Methane, BMP.

Lista de Figuras

Figura 1. Proceso de recuperación de fibra húmeda de nopal.	16
Figura 2. Diagrama de la digestión anaerobia.	22
Figura 3. Diagrama de prueba de Potencial Bioquímico de Metano (BMP)....	39
Figura 4. Diagrama de flujo lógico de investigación.	40
Figura 5. Filtrados de nopal.	43
Figura 6. Inóculo.	45
Figura 7. Pruebas de Potencial Bioquímico de Metano (BMP).	48
Figura 8. Producción de biogás acumulado (NaOH).	51
Figura 9. producción de biogás acumulado (CaO).	52
Figura 10. Composición de biogás producido (NaOH).	53
Figura 11. Composición de biogás producido (CaO).	54
Figura 13. producción acumulada de metano (NaOH).	56
Figura 14. producción acumulada de metano (CaO).	57
Figura 15. pH inicial y final (NaOH).	58
Figura 16. pH inicial y final (CaO).	59
Figura 17. Conductividad inicial y final (NaOH).	60
Figura 18. Conductividad inicial y final (CaO).	61
Figura 19. Alcalinidad inicial y final (NaOH).	62
Figura 20. Alcalinidad inicial y final (CaO).	63
Figura 21. AGV's iniciales y finales (NaOH).	64
Figura 22. AGV's iniciales y finales (CaO).	65
Figura 23. Demanda Química de Oxígeno inicial y final (NaOH).	66
Figura 24. Demanda Química de Oxígeno inicial y final (CaO).	67
Figura 25. Sólidos Totales iniciales y finales (NaOH).	69
Figura 26. Sólidos Totales iniciales y finales (CaO).	70
Figura 27. Sólidos Volátiles Totales iniciales y finales (NaOH).	71
Figura 28. Sólidos Volátiles Totales iniciales y finales (CaO).	72
Figura 29. Rendimientos.	73
Figura 30. Gráfica de efectos principales para relaciones S/N (NaOH).	75
Figura 31. Gráfica de efectos principales para relaciones S/N (CaO).	76
Figura 32. Gráfica de efectos principales para medias (NaOH).	77
Figura 33. Gráfica de efectos principales para medias (CaO).	78
Figura 34. Gráfica de interacción para medias (NaOH).	79
Figura 35. Gráfica de interacción para medias (CaO).	79
Figura 36. Proceso de extracción de nopal y aprovechamiento de los filtrados generados.	84

Lista de tablas

Tabla 1. Composición Química del nopal, en base seca (edad 1 año).	15
Tabla 2. Diseños Taguchi.	30
Tabla 3. Métodos y Técnicas de Caracterización.	36
Tabla 4. Factores del diseño experimental 1.	37
Tabla 5. Factores del diseño experimental 2.	37
Tabla 6. Diseño Experimental 1.....	37
Tabla 7. Diseño Experimental 2.....	38
Tabla 8. Caracterización de filtrados.	42
Tabla 9. Caracterización de inóculo.	43
Tabla 10. Pretratamiento de los filtrados utilizando NaOH.....	45
Tabla 11. Pretratamiento de los filtrados utilizando CaO.	45
Tabla 12. Caracterización inicial promedio de la mezcla inóculo-filtrados pretratados utilizando NaOH.	46
Tabla 13. Caracterización inicial promedio de la mezcla inóculo-filtrados pretratados utilizando CaO.....	46
Tabla 14. Caracterización inicial promedio de blancos.	47
Tabla 15. Caracterización final promedio de la mezcla inóculo-filtrados pretratados utilizando NaOH.	49
Tabla 16. Caracterización final promedio de la mezcla inóculo-filtrados pretratados utilizando CaO.....	49
Tabla 17. Caracterización final promedio de blancos.	49
Tabla 18. Producción acumulada de biogás (NaOH).....	50
Tabla 19. Producción acumula de biogás (CaO).	51
Tabla 20. Composición de biogás producido (NaOH).....	53
Tabla 21. Composición de biogás producido (CaO).	54
Tabla 22. Composición de biogás producido en blancos.....	54
Tabla 23. Producción acumulada de metano (NaOH).	56
Tabla 24. Producción acumulada de metano (CaO).	57
Tabla 25. Demanda Química de Oxígeno consumida (NaOH).	67
Tabla 26. Demanda Química de Oxígeno consumida (CaO).....	68
Tabla 27. Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido (NaOH).....	74
Tabla 28. Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido (CaO).	74
Tabla 29. Tabla de respuesta para medias (NaOH).	76
Tabla 30. Tabla de respuesta para medias (CaO).	77
Tabla 31. Agrupación de información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza del 95%.	80
Tabla 32. Prueba estadística t para los tratamientos con NaOH.....	81
Tabla 33. Prueba estadística t para los tratamientos con CaO.	81
Tabla 34. Costo comercial de agentes químicos.....	82
Tabla 35. Rendimientos con las mejores condiciones.	83
Tabla 36. Caracterización del biogás producido (NaOH).	104

Tabla 37. Caracterización del biogás producido (CaO).....	104
Tabla 38. Caracterización del biogás producido (Blancos).....	104

Glosario

- **AGV's** Ácidos Grasos Volátiles.
- **Alc.** Alcalinidad
- **BMP** Potencial Bioquímico de Metano
- **°C** Grados Celsius
- **Ca** Calcio
- **CaCO₃** Carbonato de Calcio
- **CH₄** Metano
- **CO₂** Dióxido de Carbono
- **Ca(OH)₂** Hidróxido de Calcio
- **DQO** Demanda química de Oxígeno
- **H₂** Hidrógeno
- **H₂O** Agua
- **H₂S** Ácido sulfhídrico
- **KOH** Hidróxido de potasio
- **Kg** Kilogramo
- **L** Litro
- **m³** metros cúbicos
- **mg** miligramos
- **NH₄OH** hidróxido de amonio
- **NH₃** Amoniaco
- **pH** Potencial de hidrógeno
- **ST** Sólidos Totales
- **SVT** Sólidos Volátiles Totales

Agradecimientos

Al Doctor José Apolinar y la Doctora Ma. Del Carmen Chávez, por haberme brindado todo su apoyo y compartido su conocimiento a lo largo de este proceso.

Al Conacyt por la beca brindada para llevar a cabo estudios de posgrado.

A la UMSNH especialmente a la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química, por brindarle la oportunidad de capacitarme y formarme como Maestro en Ciencias en Ingeniería Química.

A los miembros de la mesa sinodal compuesta por el Doc. J. Jesús Pacheco, Doc. Rafael Maya y Doc. Javier Lara.

A mi hermano Rodolfo, que sin duda alguna ha sido un gran ejemplo a seguir.

Al M.C.I.A. Edgar Daniel Alanís Silva por todo el apoyo brindado a lo largo de este proyecto.

A los compañeros David, Elfego y Katia por todo su apoyo brindado a la hora de la parte experimental de este proyecto.

A mis amigos Edgar, Arturo, Jerson, Julio y Javi por sus momentos amenos compartidos.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

El uso de biogás como fuente de energía renovable ha aumentado significativamente en el mundo en los últimos años, siendo los principales impulsores la iniciativa para la reducción de las emisiones de efecto invernadero, el reemplazo de combustibles fósiles, los aspectos tecnológicos y económicos que permiten generar biogás (o biometano) en condiciones estables.

La digestión anaerobia es un método adecuado y eficiente para el manejo de materiales orgánicos y una alternativa eficiente que combina la producción de biocombustibles (biogás) y el manejo sostenible de residuos; sin embargo, la digestión anaerobia es un proceso complejo y sensible que involucra numerosos microorganismos con condiciones operativas y ambientales. Los desafíos de la baja producción de biogás, el alto tiempo de retención y los altos costos de transporte de los sustratos impiden lograr el máximo rendimiento de la producción de biogás en los sistemas de digestión anaerobia.

Existen muchas alternativas de materiales orgánicos que pueden ser utilizados como sustrato para los procesos de generación de biogás, estos sustratos son principalmente residuos agrícolas, la fracción biodegradable de los desechos sólidos municipales, los desechos alimentarios, así como los residuos biodegradables de algunos procesos industriales.

La producción de biogás a partir de diferentes materiales orgánicos depende principalmente del contenido del sustrato que se puede convertir en biogás, mientras que sus composiciones químicas y biodegradabilidad son factores clave en la producción de biogás y metano (Amon y *col.*, 2007; Treichel y Fongaro, 2019). Para la producción eficiente de biogás, se debe seleccionar el sustrato más apropiado, pero el uso directo de algunos sustratos se ve obstaculizado por desequilibrios nutricionales, falta de microorganismos diversificados y los efectos de factores operativos (Achinas y *col.*, 2017).

Uno de los grandes desafíos es aumentar el rendimiento de la generación de biogás en los biodigestores. Esto se puede hacer usando estrategias para preparar

sustratos mediante diferentes mezclas para la codigestión y/o pretratar los materiales orgánicos para aumentar la biodisponibilidad del carbono orgánico, así como el estudio y la comprensión de la actividad de la comunidad de microorganismos y los procesos de inhibición para el buen desempeño de los biodigestores.

Nopal

El nopal (*Opuntia ficus-indica*) es una planta con un metabolismo del ácido crasuláceo, que ha ganado interés como cultivo energético debido a su alta eficiencia en el uso de agua y fertilizantes (Yang y *col.*, 2015; Ramírez-Arpide y *col.*, 2019), además de ser un cultivo capaz de desarrollarse en condiciones adversas con respecto de la mayoría de los cultivos convencionales.

La succulencia es la principal característica morfológica, debido a que acumula grandes cantidades de agua en periodos cortos de tiempo, que aunado con la cutícula gruesa que posee la hace más eficiente para evitar la evapotranspiración. Debido a su metabolismo ácido crasuláceo, efectúa un proceso fotosintético mediante el cual las estomas están cerrados durante el día y abiertos durante la noche evitando la pérdida de agua.

Existen más de 300 especies de *Opuntia* reconocidas en todo el mundo, y al menos 60 de ellas son nativas de México (Espino-Díaz y *col.*, 2010), que crecen principalmente en las zonas áridas (menos de 250 mm de precipitación anual) y en las zonas semiáridas (250-450 mm de precipitación anual). Cabe mencionar que México es el país líder en la producción de nopal verdura al tener la mayor superficie bajo cultivo (10 400 ha).

Este cultivo ha sido objeto de varios estudios para determinar su potencial como materia prima para la producción de biogás, Ramírez Arpide y *col.* (2017) evaluaron la sostenibilidad ambiental y energética de este proceso, concluyendo que el nopal en la codigestión con estiércol es sostenible en energía, y que el impacto ambiental es similar al del uso de residuos como materia prima e incluso menor que el de otros cultivos energéticos.

Proceso de recuperación de fibra insoluble de nopal

El proceso de recuperación de fibra insoluble de nopal consiste en una serie de etapas las cuales son: el corte de nopal, traslado, troceado, molienda y filtración; del cual se obtiene la torta húmeda (fibra insoluble) y un residuo líquido (filtrados).

La torta húmeda obtenida en el proceso está compuesta principalmente de celulosa, lignina y hemicelulosa, la cual es alimentada al proceso de secado y posteriormente a la molienda de fibra seca y empaquetado.

El residuo líquido (filtrados) generado, está compuesto por agua, mucilago, material lignocelulósico, clorofila y otros componentes en menor cantidad, el cual es desechado sin un tratamiento previo generando una contaminación por su carga orgánica.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Nopal.

El nopal (*Opuntia ficus-indica*) se cultiva en la mayor parte de los continentes del mundo, en el continente americano se cultiva en México, Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Perú y los Estados Unidos de América; en África, el nopal se puede encontrar en Argelia, Etiopía, Marruecos, Sudáfrica y Túnez; en Asia, Jordania, Líbano, Siria, los países del Golfo, Yemen e Israel; en Europa en países como Italia, Portugal y España; y en Oceanía, en Australia (Ochoa y Barbera, 2017).

Las plantas del género *Opuntia* son nativas de varios ambientes, desde zonas áridas al nivel del mar hasta territorios de gran altura. Uno de sus mayores atractivos es su anatomía y morfología adaptada a condiciones de fuerte estrés ambiental, por lo que son una alternativa de cultivo para regiones donde difícilmente crecen otras especies.

Las partes que componen una planta son sus raíces, pencas o cladodios, mismas que tienen funciones principales, como soporte o tallo, como generadoras de brotes para los nuevos cladodios y tunas, según la edad de éste.

2.1.1. Características del nopal

Las características de las especies son variables, diferenciándose en la forma de los cladodios, presencia o ausencia de espinas, tamaño y color de los frutos, las cuales cuentan con las siguientes características morfológicas:

- Raíz: son superficiales y carnosas, crecen de forma horizontal, su desarrollo depende del tipo de suelo.
- Cladodios: estos órganos tipo tallo son de color verde, poseen una capa protectora que evita la desecación, debido a su forma aplanada consiguen una mayor captación de energía solar y presentan una forma de raqueta ovoide o alongada que alcanza una longitud hasta de 60 cm-70 cm.

- Areolas: las yemas o brotes tienen forma de areola ovalada en forma de espiral y desarrollan espinas en lugar de hojas.
- Flor: las flores nacen en base de las areolas, sentadas y asiladas unas de las otras en la planta, permanecen abiertas solo de día.

El aumento del área del cladodio dura alrededor de 90 días. Sobre ambas caras del cladodio se presentan las yemas, llamadas areolas, que tienen la capacidad de desarrollar nuevos cladodios, flores y raíces aéreas según las condiciones ambientales (Vázquez, 2013; Sudzuki y col., 1993).

2.1.2. Producción de nopal

En 2015 en México se reportó una superficie sembrada de 84,923.56 hectáreas que incluye sembradíos de tuna-nopalitos, con una producción de 1, 414,872.40 toneladas lo que significó un valor económico de 3, 573,941.59 miles de millones de pesos (SIAP, 2015).

En estos cultivos, se realiza de forma constante podas a las nopaleras; de esta operación se generan grandes cantidades de residuos lo cual tiene un efecto negativo en los plantíos de nopal (Martínez y col., 2001) La producción y el manejo de los cultivos de nopal generan alrededor de 4 a 8 ton/año.ha de desechos orgánicos, que se acumulan en el suelo sin ningún tratamiento, lo que genera gases de efecto invernadero (Quintana y col., 2018).

2.1.3. Composición química del nopal

La composición química del cladodio de nopal a la edad de 1 año, en base seca, se muestra en la Tabla 2.1, en la que se observa que el nopal tiene proteínas, grasas, carbohidratos, fibra y minerales medidos como cenizas (Lopez y col., 1977; Pimienta, 1990).

Tabla 1. Composición Química del nopal, en base seca (edad 1 año).

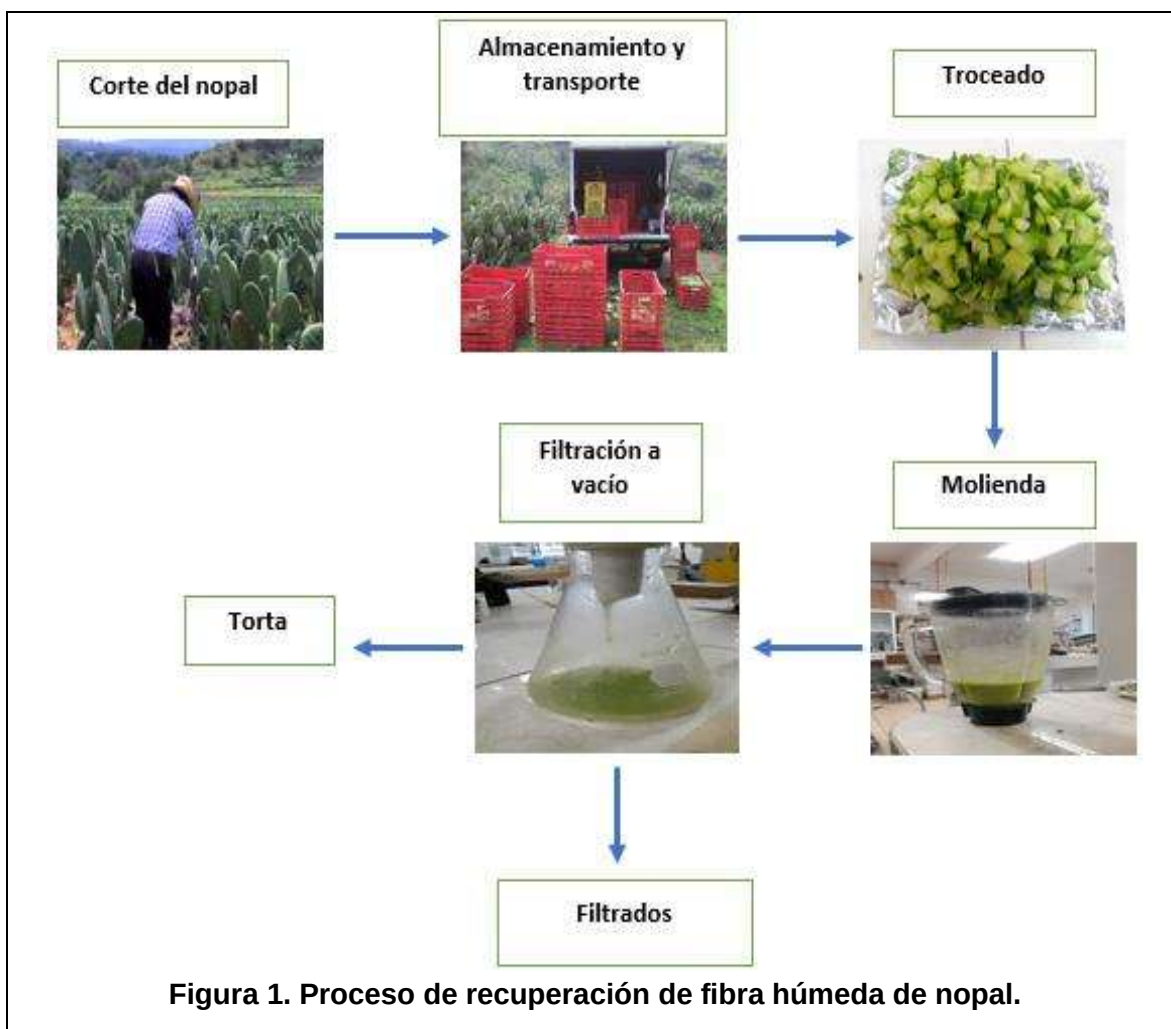
Componente	Porcentaje
Proteínas	5.4
Grasas	1.29
Carbohidratos totales	63.1
Cenizas	18.2
Fibra	12

2.1.4. Edad del nopal y contenido de fibra

La edad óptima del cladodio para la recuperación de la fibra de nopal es de 1 año, a esta edad se tiene un contenido de humedad y de fibra de 92% al 94% y 3% al 4% respectivamente y desde el punto de vista de procesamiento se tienen las mejores condiciones para la molienda y/o filtración.

2.2. Proceso de recuperación de fibra de nopal

La Figura 2.1 muestra el diagrama de flujo para las etapas del proceso de la recuperación de la fibra húmeda de nopal.



Corte de nopal: Los cladodios requeridos para el proceso de la recuperación de la fibra son cortados de la planta de nopal utilizando utensilios de corte y guantes. Las características que debe de tener el cladodio son; Una madurez de 1 año, una longitud de 50-70 cm y un color verde oscuro.

Almacenamiento y transporte: Posterior a la etapa de corte, los cladodios son almacenados en cajas de plástico para evitar algún daño. Posteriormente son transportados al lugar donde se llevará a cabo el proceso de recuperación de fibra.

Troceado: Una vez que se cuenta con el cladodio en el lugar del proceso, se realiza un troceado al cladodio para poder ser procesado en la siguiente etapa sin ninguna dificultad.

Molienda: Posterior a la etapa de troceado, el cladodio pasa al proceso de molienda.

Filtración: El concentrado obtenido en la etapa de molienda es sometido a un proceso de filtración, del cual se obtienen dos corrientes: la torta húmeda (Fibra insoluble, mucilago, clorofila y agua) y los filtrados (Agua, fibra soluble, mucilago y clorofila).

2.3. Pretratamientos

El pretratamiento es un proceso utilizado para buscar aumentar la codigestión de los sustratos, con el fin de incrementar la producción de biogás a través de aumentar la superficie, la solubilidad y las condiciones para facilitar la acción de los microorganismos (Zhang y *col.*, 2016; Muthudineshkumar y Anand. 2019).

En primera instancia los pretratamientos se han utilizado con el fin de apoyar el proceso de hidrólisis, esto por que se considera la etapa limitante en la digestión anaerobia, por medio de la ruptura de polisacáridos lignocelulósicos en monosacáridos solubles que pueden ser fácilmente utilizados por los microorganismos anaerobios (Monlau y *col.*, 2012; Barua y *col.* 2018). Se han empleado varios métodos de pretratamientos, así como la combinación de estos para mejorar la tasa de biodegradación, siendo los más comunes los pretratamientos: químico, térmico, mecánico, concentración y biológico (Chen y *col.*, 2017; Patinvoh y *col.*, 2017). Después de los diferentes pretratamientos, los carbohidratos de biomasa se liberan y por medio de la hidrólisis se transforman estos compuestos (celulosa y hemicelulosa) en una estructura más simple (glucosa, xilosa y arabinosa), que posteriormente son degradados a través de la digestión anaeróbica (Paudel y *col.*, 2017; Zhao y *col.*, 2018).

2.3.1. Pretratamiento químico

El pretratamiento básico se considera el más apropiado porque proporciona mejores condiciones de operación para la digestión anaerobia. La presencia de una pequeña cantidad de residuos alcalinos en el material pretratado puede evitar la caída del pH durante el proceso de acidogénesis (Treichel y Fongaro, 2019; Li y col., 2012; Taherdanak y Zilouei, 2014). El efecto principal del pretratamiento alcalino a través de soluciones de NaOH, KOH, Ca(OH)_2 y NH_4OH , es la eliminación de lignina de la biomasa lignocelulósica a través de la saponificación de los enlaces ester intermoleculares e interrupción de la unión entre la lignina y los carbohidratos (Castelli, 2011; Sun y Cheng, 2002), mejorando la biodegradabilidad de los polisacáridos restantes, lo que lleva a un cambio en la estructura y provoca que el sustrato se vuelva más accesible para las enzimas microbianas, favoreciendo la digestión anaeróbica (Modenbach y Nokes, 2012; Torres y Lloréns, 2008; Yao y col., 2018).

2.3.2. Pretratamiento térmico

La producción de biogás a partir de biomasa lignocelulósica también puede mejorarse mediante digestores de biogás en funcionamiento a alta temperatura, esto es particularmente importante para mejorar el paso de hidrólisis, especialmente cuando se trata de sustratos de degradación difícil, una vez que se ha mejorado la hidrólisis, la etapa metanogénica se convierte en el paso limitante del proceso anaeróbico. (Treichel y Fongaro, 2019). Además, el calor también puede emplearse para eliminar patógenos resistentes, como los virus. En estos casos, los costos de energía de la fuente de calor deben ser compensados por el aumento en la producción de metano (Bougrier y col., 2006).

2.3.3. Pretratamiento de Concentración

El sustrato debe ser acondicionado a la concentración indicada para que sea viable para su uso y no causar inhibición de las etapas de acetogénesis y metanogénesis por incremento en la concentración de AGV's causada por la degradación del sustrato en la etapa de acidogénesis (Duran y col., 2016; Sánchez-Reyes y col., 2016).

2.4. Anaerobiosis

La digestión anaerobia es el proceso en cual la materia orgánica es degradada en ausencia de oxígeno, empleando como aceptor nitratos, sulfatos o algunos compuestos orgánicos, este proceso se divide en cuatro etapas que son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Gray, 2010; Bustillo-Lecompte y col., 2015).

- Etapa hidrolítica: Se da una degradación de los compuestos orgánicos complejos (lípidos, proteínas, hidratos de carbono y compuestos inorgánicos), los cuales son despolimerizados por la acción de enzimas hidrolíticas en moléculas solubles y fácilmente degradables como ácidos grasos, aminoácidos, azúcares y compuestos inorgánicos (Yatawara, 2015).

Los microorganismos encargados de llevar a cabo esta etapa son las bacterias hidrolíticas-acidogénicas como: *Clostridium*, *Bacteroides*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Pelobacter*, *Acetobacterium*, *Micrococcus* y *Staphylococcus* (Venkiteshwaran y col., 2016; Atlas, 2001; Bermúdez y col., 1998; Pérez, 1994).

- Etapa Acidogénica: La etapa posterior a la hidrólisis es la fermentación ácida o acidogénesis, en la cual los productos generados por la hidrólisis (azúcares simples, aminoácidos y ácidos grasos) forman un sustrato de monómeros menos complejos, que luego son degradados por bacterias acidogénicas en acetatos, dióxido de carbono, hidrógeno, ácidos grasos volátiles, alcoholes (Al

Seadi y col., 2008) y subproductos como: NH_3 , CO_2 y H_2S (Zhang y col., 2014). Los principales ácidos grasos volátiles de cadena corta formados en la degradación de un compuesto orgánico son ácido acético, ácido propiónico, ácido valérico y ácido butírico (Treichel y col., 2019; Buyukkamaci y Filibeli 2004).

Los filamentos que contienen la mayoría de las especies identificadas de bacterias acidogénicas son: *Bacteroidetes*, *Chloroflexi*, *Firmicutes* y *Proteobacteria*. (Venkiteshwaran y col., 2016; De la rubia y col., 2020)

- Etapa acetogénica: En la etapa de acetogénesis, los microorganismos se encargan de convertir los compuestos intermedios formados en la fase de acidogénesis en compuestos de acetato, formiato, hidrógeno y dióxido de carbono, los cuales derivan de compuestos intermedios biodegradados como; propionato, valerato, isovalerato, butirato, isobutirato y etanol. Esta biotransformación ocurre mediante un proceso llamado acetogénesis sintrófica (Speece y col., 2006; Venkiteshwaran y col., 2015; Wang y col., 2018). Cada compuesto intermedio formado por acidogénesis tiene mecanismos de bioconversión con el propósito de obtener sustratos directos para la producción de metano.

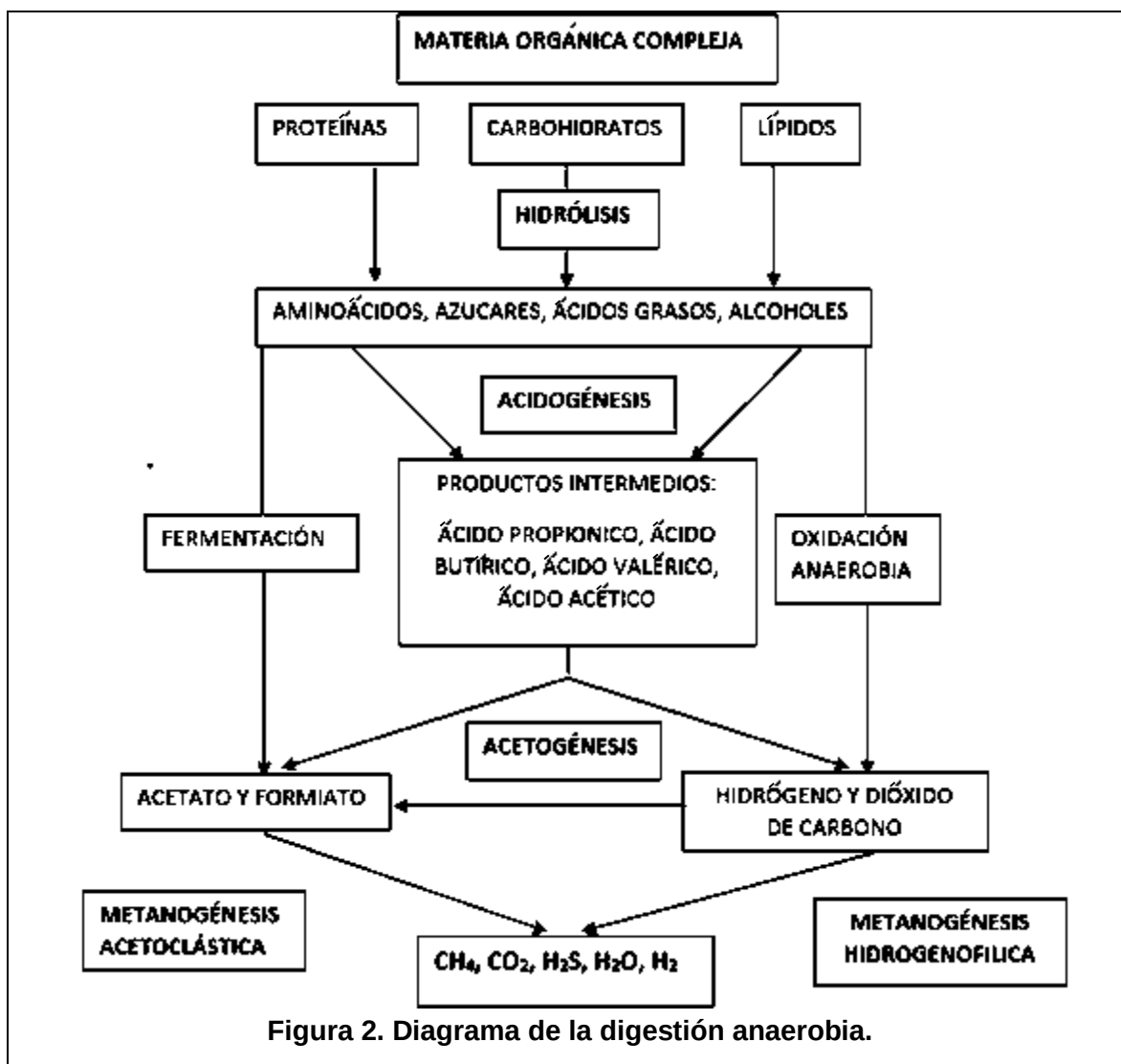
Estos mecanismos, en caso de degradación del propionato, son desarrollados por acetógenos sintróficos de géneros como *Smithella*, *Syntrophobacter* y *Pelotomaculum*. La oxidación de ácidos grasos como el butirato ocurre debido a microorganismos de los géneros *Syntrophus* y *Syntrophomonas* (Gerardi 2003; Imachi y col., 2007; Jha y col., 2011; Venkiteshwaran y col., 2015; Wang y col., 2018).

- Etapa metanogénica: Con la presencia del ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, aparecen en el medio los microorganismos responsables de la metanogénesis o formación de metano; los cuales se distinguen dos grupos principales: los que van a degradar el ácido acético produciendo metano y dióxido de carbono (Metanogénesis acetoclástica) y los que a partir del

hidrógeno y dióxido de carbono resultantes de etapas anteriores van a generar metano y agua (Metanogénesis hidrógenofílica).

La principal vía de formación del metano va a ser la vía acetoclástica, con alrededor del 70% del metano producido en forma general (Venkiteshwaran y col., 2016; Castells, 2012).

La producción de metano a partir de acetato se lleva a cabo por bacterias metanogénicas acetoclásticas, las especies más frecuentes son: *Methanosarcina Thermofila*, *Methanobrevibacter Boophilus*, *Methanospirillum Hungatei* y *Methanobacterium Formicicurn*. La conversión de CO_2 y H_2 a metano por bacterias metanógenicas hidrógenotróficas más comunes observados en los biorreactores son *Methanobacterium*, *Methanobrevibacter*, *Methanoculleus*, *Methanospirillum* y *Methanothermobacter* (Cai y col., 2016; De la Rubia y col., 2020). Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptimo para las metanobacterias, esto debido a que se inhiben severamente por falta de nutrientes



El biogás producido por el proceso de digestión anaerobia de materia orgánica consta principalmente de dos componentes: (1) metano (CH_4), con un porcentaje que varía entre 55% y 70% de su volumen total y (2) dióxido de carbono (CO_2), con un porcentaje que varía entre 30% y 40% de su volumen total (Angelidaki y Batstone, 2010; Córdova y Chamy, 2020). Dependiendo de las fuentes del sustrato utilizado para obtener el biogás, podrían estar presentes otros compuestos como hidrógeno, nitrógeno, oxígeno (<1%), sulfuro de hidrógeno (0-50 ppm), compuestos de azufre, compuestos aromáticos, compuestos orgánicos volátiles halogenados y siloxanos (Brennan y Owende, 2013; Córdova y Chamy, 2020).

Toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida a fermentación anaerobia; la calidad y la cantidad del biogás producido dependerán de la composición y la naturaleza del residuo utilizado.

2.5. Factores en el proceso anaerobio

La digestión anaerobia está influenciada por una serie de factores que determinan su eficiencia, como son: temperatura, requerimientos de pH y alcalinidad y composición del sustrato, principalmente (Lin y col., 2019).

2.5.1. Relación carbono/nitrógeno

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas, del cual el carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un intervalo de 30:1 hasta 20:1.

La descomposición de materiales con alto contenido de carbono, superior a 35:1, ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, por la falta de nitrógeno, pero el período de producción de biogás es más prolongado; con una relación C/N menor de 8:1 se inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso.

2.5.2. Temperatura

La temperatura de operación va a influir decisivamente en el proceso anaerobio, este parámetro va a depender de las velocidades de reacción con las que se lleve a cabo la digestión anaerobia y la composición del biogás, debido a la dependencia de la solubilidad de los diferentes gases con la temperatura, y el daño que se puede causar a algunos de los microorganismos del medio. Las reacciones bioquímicas durante la acidogénesis, la acetatogénesis o la metanogénesis están sujetas a leyes termodinámicas; el aumento de la temperatura acelera la velocidad de las reacciones bioquímicas catalizadas por las enzimas, pero, por otro lado, debido a la naturaleza proteica de las enzimas, la temperatura demasiado alta provoca la desnaturalización e inhibición del proceso. Dependiendo de la temperatura óptima de la actividad metabólica más alta, se distinguen tres grupos de microorganismos

- psicrófilo (menos de 25° C)
- mesófilico (30° C- 40° C)
- termófilico (50° C- 60° C)

Entre los microorganismos de digestión anaerobia, los metanógenos son los más sensibles a los cambios de temperatura (Cha y Noike, 1997; Jankowska y *col.*, 2019) y los cambios de temperatura altos o frecuentes son particularmente desventajosos.

2.5.3. pH

El control de este parámetro resulta muy importante ya que el proceso de degradación anaerobia de la materia orgánica debe realizarse entre un intervalo de pH entre 6.8 y 7.5 (Li y *col.*, 2017), esto debido a que las bacterias acetogénicas y metanogénicas, quienes regulan el proceso, son muy sensibles a altos valores de acidez, un pH menor a 6.5 implica acidificación del reactor, por lo tanto, una inhibición de las bacterias metanogénicas; sin embargo, las bacterias encargadas de las etapas de hidrólisis y acidogénesis presentan alta actividad en medios más

ácidos, con un pH óptimo entre 4.5 y 6.3, por lo que un reactor a ese pH lograra una solubilización de la materia orgánica pero no una metanización.

2.5.4. Alcalinidad

La alcalinidad se define como la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos presentes en el sustrato y se expresa como la concentración de carbonato de calcio ($\text{mg CaCO}_3/\text{L}$). La alcalinidad se encuentra directamente relacionada con el pH y en conjunto con la concentración de ácidos grasos volátiles es uno de los parámetros de control (López Torres y Espinosa Llorens, 2008; Alanís, 2017). Para tener una capacidad buffer adecuada y asegurar una operación estable del reactor anaerobio se recomienda una concentración superior a los $1000 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$, con lo cual se asegura una excelente actividad buffer (Fernández-Polanco y Seghezzo, 2015; Alanís, 2017).

2.5.5. Relación AGV'S/ Alcalinidad

Las concentraciones de alcalinidad y ácidos grasos volátiles indican la capacidad de tampón del sistema, evitando la acidificación, es por ello que el parámetro de control más utilizado es la relación ácidos grasos volátiles/ alcalinidad, de manera que, si esta relación aumenta, significa que existe un desequilibrio en el sistema, una relación alta puede provocar la disminución del pH inhibiendo las bacterias formadoras de metano (Fernández, 2006). La cantidad excesiva de ácidos grasos volátiles en el sistema puede ser provocada por la presencia de una carga orgánica muy elevada, por una caída en la temperatura o por la acumulación de mucha espuma, principalmente.

La concentración de ácido carbónico está relacionada con el por ciento de CO_2 en el digestor. Cuando la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV'S) se incrementa, éstos son neutralizados por una alcalinidad al bicarbonato y entonces

una alcalinidad total está compuesta por ambas alcalinidades, o sea, al bicarbonato y a los ácidos grasos volátiles (AGV'S) (Menéndez, 2003). La producción y a la acumulación de los AGV'S, que consumen alcalinidad bicarbonática pueden llegar a causar acidificación, lo que conlleva a una inhibición de los consorcios microbianos acetogénicos y metanogénicos. Este comportamiento ratifica la importancia de controlar la digestión anaerobia, no sólo con el pH, sino también con la alcalinidad, para identificar ocurrencia de condiciones de capacidad buffer y neutralización de la acidez (Torres y Pérez, 2008).

2.5.6. Toxicidad

La inhibición en la producción de biogás puede entenderse como la ocurrencia de fallas en la digestión anaeróbica que ocurre debido a la presencia de sustancias tóxicas en el biodigestor como componentes del sustrato o incluso subproductos metabolizados por microorganismos (Yatawara, 2015).

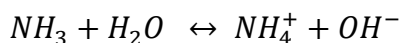
Aunque es fácil producir metano, la digestión anaeróbica es un proceso altamente complejo, que expone al sistema a los efectos de inhibición por la concentración de ácidos grasos de cadena larga, ácidos grasos volátiles, amoníaco y otras condiciones inapropiadas de temperatura y pH (Amha y col., 2018; Chen y col., 2014)

Muchos de los compuestos tóxicos son estimulantes de la actividad biológica cuando se encuentran presentes en bajas concentraciones, el aumentar la concentración tiene como resultado la estimulación de la tasa biológica la cual alcanza un máximo al llegar a la concentración óptima, sí este óptimo es superado el aumento en la concentración produce la inhibición de los procesos, por lo cual el tener un control de la concentración de dichas sustancias tóxicas o inhibidoras es de gran importancia (Fernández-Polanco y Seghezzo, 2015).

- Ácidos Grasos Volátiles (AGV): La concentración de ácidos grasos volátiles (AGV), productos intermedios mayoritarios del proceso anaeróbico, es uno de

los parámetros que más eficazmente pueden indicar la evolución del proceso. Las acumulaciones de estos provocan una disminución en el pH lo que conlleva una inhibición del proceso, esta acumulación sucede cuando la relación simbiótica entre acidogénicos y metanogénicos se rompe. La forma no disociada en de los AGV's es considerada toxica para los microorganismos.

- Hidrógeno (H₂): El hidrógeno es también un compuesto intermedio importante del proceso anaeróbico y su acumulación en el medio provoca la inhibición de la acetogénesis y, consecuentemente, la acumulación de ácidos grasos volátiles con más de dos átomos de carbono.
- Amoniac: El pH juega un papel clave en el equilibrio de disociación del amoniaco/amonio.



La forma NH₃ causa severos problemas de toxicidad en los procesos anaerobios por lo cual es importante el desplazar la reacción hacia la derecha. Con bacterias bien aclimatadas es posible alcanzar niveles de 4 g NH₄⁺/ L (pH=8) (Fernández-Polanco y Seghezzo, 2015; Alanís, 2017).

- Sulfatos y sulfuros: La presencia de elevadas concentraciones de sulfato en el sustrato puede producir la inhibición del proceso anaeróbico, especialmente de la metanogénesis, debido a que la presencia de sulfatos, las bacterias metanogénicas compiten con las sulfato-reductoras por los mismos sustratos (acetato e hidrógeno), mostrando éstas últimas ventajas termodinámicas y cinéticas sobre las primeras. El resultado de esta competencia determinará la proporción de ácido sulfhídrico y metano en el biogás producido.
El sulfuro puede producirse durante la degradación de materia orgánica que contiene azufre (proteínas), encontradas en residuos tales como el guano de cerdo el cual es un inhibidor para muchos grupos bacterianos. En general, los

metanogénicos son más sensibles que los acidogénicos y acetogénicos, comenzando a ser tóxica una concentración de 50 mg/l, si los microorganismos metanogénicos no están aclimatados a los sulfuros. La forma más tóxica para los metanogénicos corresponde a la no ionizada (H_2S), por lo que la inhibición se favorece a pH bajos y a bajas temperaturas. La forma ionizada (HS^-) causa menor toxicidad.

- Metales pesados: Algunos metales presentan la característica de potenciar la producción de biogás (Ni, Co, Mn y Fe) debido a que estimulan la actividad de la comunidad microbiana (Abdel-Shafy y Mansour 2014; Yue y col., 2007). Sin embargo, la presencia de metales pesados (Cu, Pb, Cr y Zn) tiene consecuencias negativas bajo el proceso de digestión, actuando de manera inhibitoria, inactivando enzimas que son metabolizadas por microorganismos presentes en el reactor (Abdel-Shafy y Mansour 2014; Selling y col., 2008). El nivel inhibitorio depende de la toxicidad del metal y la acumulación de sustancias intermedias, como los ácidos orgánicos, que se producen a partir de la inhibición del proceso de arqueas metanogénicas (Abdelsalam y col., 2017; Abdel-Shafy y Mansour, 2014).

2.6. Potencial bioquímico de producción de metano (BMP)

La prueba de potencial bioquímico de producción de metano (BMP, por sus siglas en inglés) es un parámetro clave (Angelidaki y col., 2009; Raposo y col., 2011a; Naroznova y col., 2016; Nielfa y col., 2015a), que se ha utilizado como el indicador más relevante para pronosticar la biodegradabilidad de sustratos y refleja la descomposición biológica de los materiales orgánicos (Rodrigues y col., 2018; Triolo y col., 2011), la cual corresponde al rendimiento de metano en un periodo de tiempo que fluctúa entre 20 a 100 días de digestión anaerobia (Da Silva y col., 2018). La determinación experimental de la prueba puede verse influenciada por varios factores relacionados con el inóculo, el sustrato, el método utilizado para cuantificar

el biogás, las condiciones de funcionamiento (temperatura, relación de inóculo a sustrato, tiempo del ensayo, etc.) (Raposo y col., 2011b).

2.7. Diseños experimentales

Hoy en día es necesario la optimización de los recursos, por lo que es necesario aplicar técnicas experimentales que no solo ayudan a ahorrar costos y tiempo de operación, sino que también son eficientes y pueden ser reproducibles, esto con el fin de obtener información confiable y precisa. Existen técnicas tales como el método de superficie de respuesta, la red neuronal artificial, el algoritmo genético y el método Taguchi, que se utilizan ampliamente en la optimización de los parámetros del proceso.

En la presente investigación se eligió el método Taguchi dado que permite examinar varios parámetros al mismo tiempo con pocas condiciones experimentales y proporciona información cuantitativa. Los métodos de Taguchi son técnicas estadísticas para realizar experimentos que pueden determinar las mejores combinaciones de variables y procesos para desarrollar un experimento, el cual utiliza técnicas que implican bajos costos y que son aplicables a los problemas y requerimientos de la industria moderna (Taguchi, 2009). El propósito que se tiene en el diseño del experimento es encontrar aquella combinación de factores que nos proporcione un desempeño más estable y costo de desarrollo más bajo. Taguchi (1992) valora la ventaja fundamental de los arreglos ortogonales es que pueden ser aplicados al diseño experimental involucrando un gran número de factores. La metodología de Taguchi enfatiza:

- Diseño Robusto: es la búsqueda por el conjunto de condiciones para lograr un comportamiento del proceso óptimo.
- Minimización de la función de pérdida: es la minimización de la pérdida económica debido a las corridas en condiciones no-óptimas.

- Maximización de la señal razón a ruido: es el alcance de los mejores objetivos del proceso bajo las condiciones no controlables (ruido).
- Selección del diseño experimental para examinar las gráficas lineales, que permiten además la investigación de las interacciones de los efectos deseados, basados en el proceso conocido.

En general, para un arreglo a dos niveles, el número de columnas (efectos o factores) que se pueden analizar, es igual al número de renglones más uno. Taguchi ha desarrollado una serie de arreglos para experimentos con factores a dos niveles, los más utilizados y difundidos según el número de factores a analizar son descritos en la Tabla 2 (Taguchi, 2005).

Tabla 2. Diseños Taguchi.

# factores	1-3	4-7	8-11	12-15	16-31	32-63
Arreglo	L4	L8	L12	L16	L32	L64
# pruebas	4	8	12	16	32	64

2.8. Antecedentes

Baeza en 1995 reportó que el valor calorífico del biogás del cactus es de 7058 kcal / m³ y que el potencial del biogás de Opuntia es equivalente a 0.360 m³ / kg de materia seca. La producción de 30 toneladas al año es equivalente a 82.2 kg al día, que se pueden utilizar como materia prima para la producción de biogás con un potencial de 29 m³ / día o 10885 m³ /ha año de biogás, comparable a 6.4 toneladas de petróleo. (Varnero, 1991).

Toha en 1999 reportó que 3 kg de cladodios secos pueden producir 1 m³ de biogás, equivalente a 10 kWh de potencia.

Obach y Lemus en 2006 obtuvieron después de 83 días un rendimiento de 501 mLCH₄ por g de SV alimentado.

Jigar y col. en 2011 obtuvieron un rendimiento de metano de 186 mLCH₄ por g de sólidos volátiles (SV) alimentados, bajo codigestión de estiércol y nopal en una proporción de 25:75, concluyendo que el nopal es un cultivo adecuado para la producción de energía renovable.

Kuloyo y col. en 2014 sugieren que los cladodios de nopal podrían servir como materia prima de segunda generación para la producción de etanol.

Cushman y col. en 2015 mencionan que las plantas de nopal podrían usarse en sistemas híbridos de bioenergía y producción de energía renovable en un sistema solar fotovoltaico-nopal integrado.

Caballero-Nolasco en 2017 trabajaron con cladodio de nopal y estiércol de vaca lechera en codigestión, en reactores de laboratorio semicontinuos de 10 L, reportando un rendimiento de CH₄ de 245.6 ml por g de sólidos totales (ST). Esta cantidad se obtuvo usando una relación 3:1 de cladodios de nopal y estiércol de vaca respectivamente en condiciones mesofílicas.

Ramírez-Arpide y col. en 2018 demostraron que la codigestión de cladodios de nopal y estiércol de vaca lechera para la producción de biogás era energéticamente sostenible.

Lueangwattanapong y col. en 2019 evaluaron la producción de metano a partir de diferentes materias primas a partir de la prueba de potencial bioquímico de metano (BMP). Entre las materias primas utilizadas se encuentran el nopal (*Opuntia ficus Indica*) el cual tuvo una producción de metano en 40 días de incubación de 300.8 ± 19.2 ml/g SV.

García y col. 2019 evaluaron el potencial de metano de diferentes sustratos de procesamiento agrícola y de alimentos para mejorar la producción de biogás en áreas rurales. En el que el nopal (*Opuntia ficus Indica*) tuvo una producción de metano de 364 L CH₄/ kg SVT, mayor a la reportada en la literatura (142 L CH₄/ kg SVT).

Ramírez-Arpide y col. en 2019 llevó a cabo un análisis donde se concluyó que el nopal como cultivo energético tiene ventajas sobre los cultivos energéticos

recolectados en el campo, como el pasto de varilla porque reduce los costos de recolección y transporte, factores que han sido identificados por el Plan de Acción Nacional de Biocombustibles como barreras para proporcionar cantidades sostenibles de biomasa. Además, el cultivo de nopal permite una mejor programación de cosecha y estandarización de las características de la biomasa.

2.9. Justificación

Actualmente las preocupaciones sobre la sostenibilidad, la emisión de gases de efecto invernadero, el cambio climático y disponibilidad de combustibles derivados del petróleo, han provocado la búsqueda de nuevas fuentes de energía sostenibles que sean más viables y respetuosas con el medio ambiente, es por ello que las fuentes de energía como los biocombustibles renovables han tomado relevancia en su estudio y aplicación.

Uno de los principales biocombustibles es el biogás, el cual puede ser obtenido a partir de procesos anaeróbicos utilizando diferentes fuentes residuales con alta carga orgánica como lo son: los residuos agrícolas, la fracción biodegradable de los desechos municipales, los desechos alimentarios, residuos ganaderos, así como los residuos biodegradables de procesos agroindustriales, los cuales son descargados o desechados sin un tratamiento previo.

El biogás generado en el proceso puede ser utilizado en diferentes equipos como combustible para la generación de calor y electricidad, así como reactivo en diferentes síntesis. Es por ello la importancia de realizar esta investigación, dado que la fuente es considerada un residuo, del cual se puede obtener un producto con un valor agregado (biogás).

2.10. Planteamiento del Problema

Durante el proceso de extracción de la fibra insoluble de nopal se generan filtrados que están compuestos de agua, mucilago, clorofila, fibra soluble y otros compuestos en pequeña proporción, los cuales son desechados sin un tratamiento previo, generando un residuo líquido que provoca problemas de contaminación debido a su carga orgánica, el cual puede ser utilizado para generar un producto de valor agregado (biogás) que a su vez puede ser utilizado como biocombustible en el proceso de extracción o secado de la fibra insoluble.

2.11. Hipótesis

La aplicación de pretratamientos químicos, por adición de hidróxido de sodio u óxido de calcio, y de control de la concentración de alimentación en los filtrados generados en el proceso de extracción de la fibra de nopal, permitirán que se potencialicen las etapas de acetogénesis y metanogénesis en el proceso de digestión anaerobia por lotes, de tal forma que se producirá un biogás con un contenido de metano superior al 60%.

2.12. Objetivos

2.12.1. Objetivo General

Evaluar la producción de metano a partir de la aplicación de los pretratamientos químicos, por adición de hidróxido de sodio u óxido de calcio, y de control de la concentración de alimentación en los filtrados generados en el proceso de extracción de la fibra de nopal.

2.12.2. Objetivos Específicos

1. Conocer las propiedades fisicoquímicas del inóculo y de los filtrados generados en el proceso de la extracción de fibra insoluble de nopal
2. Evaluar la producción de metano a diferentes condiciones de pretratamiento mediante las pruebas de potencial bioquímico de producción de metano (BMP).
3. Establecer las mejores condiciones de pretratamiento a través de las pruebas BMP para la mayor producción de metano.

3.METODOLOGÍA

3.1. Caracterización

3.1.1. Ubicación Experimental

La evaluación de los residuos líquidos generados en la extracción de la fibra insoluble de nopal para la producción de biogás en las pruebas BMP, evaluando dos bases químicas y ajuste de concentración como pretratamientos, se desarrolló en el laboratorio de ingeniería ambiental y biotecnología, de la división de estudios del Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, situados en Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán.

3.1.2. Sustrato e Inóculo

El sustrato e inóculo se caracterizaron a partir de las normas/métodos mostrados en la tabla 3. El sustrato utilizado se obtuvo del proceso de la extracción de la fibra insoluble de nopal, el cual se lleva a cabo a nivel laboratorio obteniendo dos productos finales: torta húmeda y filtrados (Sustrato). El inóculo utilizado fue proporcionado por una planta tratadora de aguas residuales ubicada en la ciudad de Morelia, Michoacán, el cual fue necesario realizarle un acondicionamiento, previa utilización en la prueba BMP.

Tabla 3. Métodos y Técnicas de Caracterización.

Parámetro	Norma/Método
Conductividad	NMX-AA-093-SCFI-2000
Temperatura	NMX-AA007-SCFI-2013
pH	NMX-AA-005-SCFI-2011
Alcalinidad	NMX-AA-036-SCFI-2001
Sólidos y sales	NMX-AA034-SCFI-2015
Ácidos Grasos	Método 8196 HACH
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Método 8000 HACH
Nitrógeno Total	Método 10242 HACH

Fósforo Total	Método 10127 HACH
Relación alfa	Método potenciométrico/Volumétrico

3.2. Diseños experimentales

Los diseños de experimentos que se utilizaron fueron dos diseños ortogonales Taguchi L₄ (Tablas 4 y 5), teniendo dos niveles (alto y bajo) de evaluación para cada factor de pretratamiento. Estos diseños se obtuvieron utilizando el programa de cómputo Minitab 19® (Tablas 6 y 7) de los cuales cada prueba se realizó por duplicado, así mismo se utilizaron dos blancos como referencia; los cuales fueron una mezcla de inóculo-agua (BL) (BLR) e inóculo-sustrato sin pretratar (BS) (BSR).

Tabla 4. Factores del diseño experimental 1.

Factores del Diseño Experimental 1			
Factores	Parámetro	Niveles	
		Alta	Baja
Químico (CaO)	pH	8.5	6.5
Concentración	DQO (mg/L)	20 000	10 000

Tabla 5. Factores del diseño experimental 2.

Factores del Diseño Experimental 2			
Factores	Parámetro	Niveles	
		Alta	Baja
Químico (NaOH)	pH	8.5	6.5
Concentración	DQO (mg/L)	20 000	10 000

Tabla 6. Diseño Experimental 1.

Agente Químico (CaO)

Prueba	Químico (pH)	Concentración (mg/L)
1	8.5	20 000
1R	8.5	20 000
2	8.5	10 000
2R	8.5	10 000
3	6.5	10 000
3R	6.5	10 000
4	6.5	20 000
4R	6.5	20 000
BS	-	-
BSR	-	-
BL	-	-
BLR	-	-

Tabla 7. Diseño Experimental 2.

Agente Químico (NaOH)		
Prueba	Químico (pH)	Concentración (mg/L)
1	8.5	20 000
1R	8.5	20 000
2	8.5	10 000
2R	8.5	10 000
3	6.5	10 000
3R	6.5	10 000
4	6.5	20 000
4R	6.5	20 000
BS	-	-
BSR	-	-
BL	-	-
BLR	-	-

3.3. Pruebas BMP

El sistema BPM consistió en reactores por lotes con una capacidad de 500 mL (frascos *Schott*) con tapa de polipropileno adaptada a una salida de biogás, con volumen de trabajo de 400 mL (200 mL de inóculo y 200 mL de filtrados pretratados). La medición de biogás producido se realizó por desplazamiento del volumen de agua en un recipiente de polipropileno con una capacidad medible de 1 L sellado herméticamente. El proceso de degradación anaerobia se controló a condiciones mesofílicas de 35°C en incubadora marca *Thermo Scientific* modelo *Heratherm* por un periodo de 62 días.

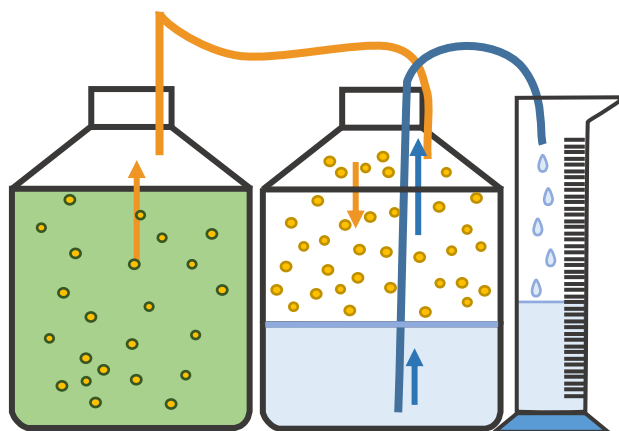


Figura 3. Diagrama de prueba de Potencial Bioquímico de Metano (BMP).

3.4. Caracterización del biogás

La caracterización del biogás se realizó en un cromatógrafo de gases *BUCK Scientific* con detectores de ionización de flama (*FID*) y conductividad térmica (*TCD*), columna empacada con sílica gel en tubo de acero inoxidable de 1 metro de longitud y 1/8" de diámetro.

3.6. Diagrama de Flujo Lógico de la Investigación

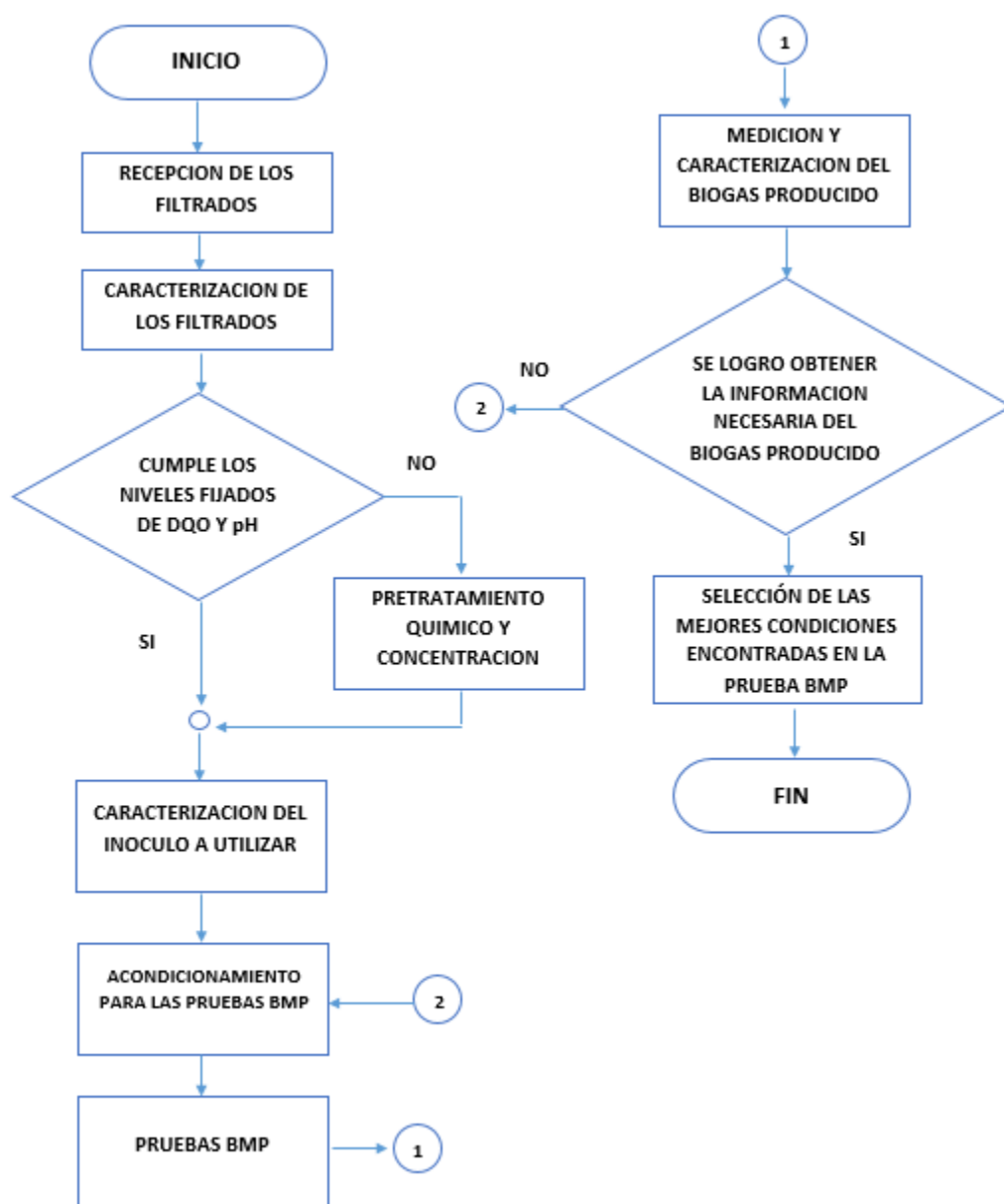


Figura 4. Diagrama de flujo lógico de investigación.

4.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización del sustrato e inóculo

4.1.1. Caracterización del sustrato

Los resultados de los parámetros medidos en la caracterización de los filtrados generados en la extracción de la fibra insoluble de nopal (Figura 5) se reportan en la tabla 8, en donde se observa que no es recomendable utilizarlos directamente en el proceso de digestión anaerobia dado que diferentes parámetros se encuentran fuera de las condiciones recomendadas. El valor de pH de 4.9 es inferior al intervalo recomendado de 6.5-8.2, debido a que valores inferiores o superiores a este intervalo, se ve disminuida la tasa de producción de biogás (Syaichurrozi y col., 2018, Speece, 1996), dado que los grupos bacterianos metanogénicos generan una mejor producción de metano en el intervalo de 6.8 y 7.2 (Kirk y Gould, 2020). El valor de alcalinidad se encuentra en 13,300 mg CaCO_3/L , valor considerado alto por García (2012); sin embargo, Sandoval y col., (2007) concluyen que la alcalinidad puede estar en el intervalo de 12,000-18,000 mg CaCO_3/L , sin ocasionar desequilibrios en el sistema.

Tabla 8. Caracterización de filtrados.

Filtrados	
Parámetro	Valor
pH	4.914
Conductividad (mS/cm)	10.42
DQO (mg/L)	60850
Alcalinidad (mg CaCO_3/L)	13300
ST (mg/L)	53170
STV (mg/L)	41880
Fosforo (mg/L)	168.04
Nitrógeno (mg/L)	750
Temperatura (°C)	24.6
AGV's (mg/L)	4135

El valor de la carga orgánica de 60,850 mg DQO/L es superior a 35,000 mg DQO/L que es el recomendado para evitar la acidificación del sistema (Sandoval 2020; Alanís, 2017).

La relación DQO/N/P (362.12/4.46/1) es inferior en el contenido de nitrógeno en un 36.3 % con la recomendada por Xu y col (2015) para sustratos con alto contenido orgánico (350/7/1).

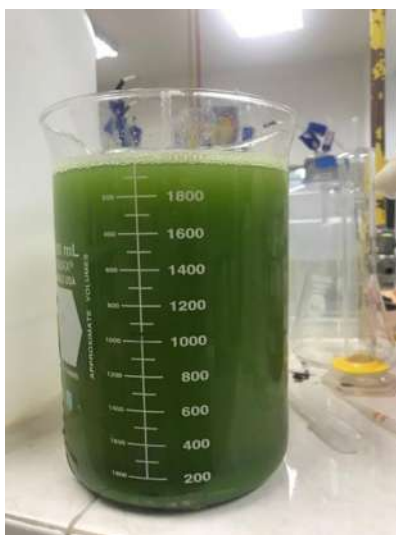


Figura 5. Filtrados de nopal.

4.1.2. Caracterización del inóculo.

La tabla 9 muestra la caracterización del inóculo (Figura 6) utilizado para la prueba BMP para estimar su funcionamiento y factibilidad en el proceso de digestión anaerobia.

Tabla 9. Caracterización de inóculo.

Inóculo	
Parámetro	Valor
pH	8.172
Conductividad (mS/cm)	25.24

DQO (mg/L)	130200
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	30875
ST (mg/L)	97920
STV (mg/L)	58080
Fósforo (mg/L)	3592.5
Nitrógeno (mg/L)	5250
Temperatura (°C)	24.1
Relación Alfa	0.76
STV/ST	0.59
AGV's (mg/L)	8105

Los parámetros que destacan se encuentra el pH, cuyo valor es de 8.172. De acuerdo con García (2012), este valor se encuentra fuera del intervalo recomendado de 7 a 7.8; sin embargo, se encuentra dentro del intervalo de 6 a 8.5, el cual mantiene a todos los consorcios microbianos estables dentro del reactor, con el cual pueden llevar a cabo sus funciones vitales, así como su desarrollo (Ferreira, 2013).

El valor de la conductividad eléctrica de 25.24 mS/cm es menor a 35 mS/cm, que es límite máximo recomendado por Ogata y col (2016), con el cual se inhibe la producción de metano.

El valor de la relación alfa de 0.76, indica que el inóculo empleado en la prueba BMP, tiene la suficiente capacidad amortiguadora para inhibir cambios bruscos de pH y contribuye con el correcto funcionamiento de los microorganismos (Alanis, 2019; Pérez y col., 2009).

El valor de 0.59 de la relación STV/ST, indica de forma indirecta el contenido de biomasa activa y es considerado adecuado para la degradación anaerobia, debido a que es superior a 0.5 recomendado por García (2012).

La alta concentración de nitrógeno total en el inóculo (5250 mg/L) es un aporte de suma importancia debido a que a través de éste se compensa el déficit del sustrato, requerido para la digestión anaerobia (Parra y col., 2017).

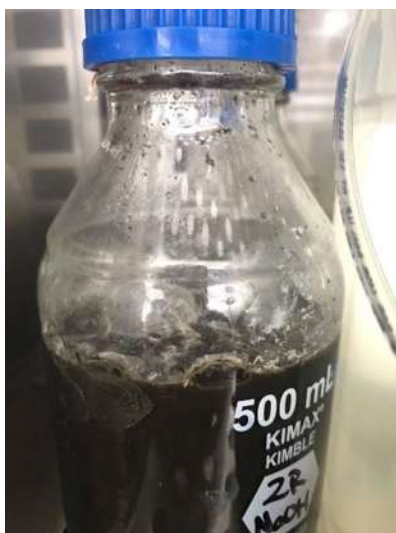


Figura 6. Inóculo.

4.2 Pretratamientos

En las tablas 10 y 11 se muestran los resultados de la caracterización de los pretratamientos aplicados a los filtrados obtenidos en el proceso de extracción de la fibra insoluble de nopal (de acuerdo con las tablas 4 y 5).

Tabla 10. Pretratamiento de los filtrados utilizando NaOH.

NaOH								
Parámetro	1	1R	2	2R	3	3R	4	4R
DQO (mg DQO/L)	20,000	20,000	10,000	10,000	10,000	10,000	20,000	20,000
pH	8.488	8.534	8.433	8.505	6.527	6.514	6.526	6.562

Tabla 11. Pretratamiento de los filtrados utilizando CaO.

CaO								
Parámetro	1	1R	2	2R	3	3R	4	4R
DQO (mg DQO/L)	20,000	20,000	10,000	10,000	10,000	10,000	20,000	20,000
pH	8.887	8.705	8.533	8.393	6.687	6.517	6.581	6.473

Como se observa en las tablas 10 y 11 no existe una diferencia considerable en los valores de pH ajustados en comparación de los niveles propuestos en el diseño experimental, teniendo una excepción únicamente en las pruebas 1 y 1R

(Agente químico: CaO), donde se sobrepasó un 4.5% y 2.4% respectivamente del valor propuesto de 8.5 y 6.5.

4.3. Caracterización inicial de la mezcla inóculo-sustrato

Una vez realizado el pretratamiento de los filtrados obtenidos en el proceso de la obtención de la fibra insoluble de nopal, se realizó el proceso de mezclado inóculo-sustrato pretratado en una relación volumétrica 1:1 respectivamente para cada prueba según el diseño de experimentos Taguchi L₄. Los resultados de la caracterización se muestran en las tablas 12, 13 y 14. El análisis de los resultados de las tablas 12 y 13 se realizan a partir del apartado 4.9.

Tabla 12. Caracterización inicial promedio de la mezcla inóculo-filtrados pretratados utilizando NaOH.

Parámetro	NaOH			
	Prueba			
	1	2	3	4
pH	8.16	8.20	8.091	8.03
Conductividad (mS/cm)	15.145	14.325	14.385	14.915
DQO (mg/L)	75100	70100	70100	75100
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	18050	16150	17100	15675
ST (mg/L)	65885	55600	58685	63620
SVT (mg/L)	35260	32720	33785	35525
AGV's (mg/L)	3700	3350	3252.5	3830

Tabla 13. Caracterización inicial promedio de la mezcla inóculo-filtrados pretratados utilizando CaO.

Parámetro	CaO			
	Prueba			
	1	2	3	4
pH	8.35	8.35	8.15	8.04
Conductividad (mS/cm)	14.995	14.45	14.47	15.17
DQO (mg/L)	75100	70100	70100	75100
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	17100	15675	16150	19000
ST (mg/L)	62865	62735	67120	70060

SVT (mg/L)	39235	35090	36715	39560
AGV's (mg/L)	3555	3232.5	3435	4120

En la tabla 14 se muestran los valores iniciales para los blancos utilizados como control durante la prueba BMP, en la cual se observa que el valor de AGV's para inóculo y sustrato (4052.5 mg/L y 4972.5 mg/L respectivamente) es superior a intervalo recomendado de 1500-2000 mg/L, condición que puede llevar a una rápida acidificación del sistema (Bajpai, 2017; Acosta y col., 2005; García, 2012) así como el valor de alcalinidad para el blanco inóculo-filtrados sin pretratamiento dado que es superior a 18,000 mg CaCO₃/L (Intervalo superior recomendado). Para el blanco (inóculo-agua); los valores de los parámetros pH, alcalinidad y conductividad se encuentran dentro de los intervalos recomendado para llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia. Cabe hacer notar que el pH del blanco inóculo- filtrados sin pretratamiento (BS) se encontró en 7.3 debido a que la incorporación del inóculo estabilizado (Weiland, 2010).

Tabla 14. Caracterización inicial promedio de blancos.

Blancos		
Parámetro	BL	BS
pH	8.351	7.3485
Conductividad (mS/cm)	12.975	16.855
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	15437.5	22325
DQO (mg/L)	65100	95525
ST (mg/L)	48960	85430
SVT (mg/L)	29040	48685
AGV'S (mg/L)	4052.5	4972.5

4.4. Prueba BMP

En la figura 7 se muestra el sistema de la prueba BMP, en donde se observan los frascos de reacción dentro de la incubadora y los sistemas de medición de producción de metano, con un periodo de seguimiento de la prueba de 62 días.



Figura 7. Pruebas de Potencial Bioquímico de Metano (BMP).

4.5. Caracterización final de la mezcla inóculo-sustrato

Una vez terminada la prueba BMP se procedió a realizar la caracterización de cada prueba obteniendo los resultados mostrados en las tablas 15, 16 y 17, los valores de las tablas 15 y 16 se analizarán por separado a partir del apartado 4.9.

La tabla 17 muestra los valores finales de los blancos utilizados durante la prueba BMP, donde se observa que los parámetros pH, conductividad y alcalinidad se encuentran dentro de los intervalos recomendados para el proceso de digestión anaerobia. Los valores de los parámetros (DQO, AGV's y SVT) muestran una concentración remanente con un alto contenido de materia orgánica sin ser aprovechado para la producción de biogás por los diferentes consorcios microbianos.

Tabla 15. Caracterización final promedio de la mezcla inóculo-filtrados pretratados utilizando NaOH.

NaOH				
Parámetro	Prueba			
	1	2	3	4
pH	7.87	7.8705	7.8485	7.87
Conductividad (mS/cm)	16.69	15.99	16.285	16.04
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	15500	16500	15000	16000
DQO (mg/L)	46250	48350	48950	50400
ST (mg/L)	44930	43060	44285	44035
SVT (mg/L)	23620	23120	23315	23935
AGV'S (mg/L)	2495	2065	2105	2450

Tabla 16. Caracterización final promedio de la mezcla inóculo-filtrados pretratados utilizando CaO.

CaO				
Parámetro	Prueba			
	1	2	3	4
pH	7.8875	7.8585	7.8275	7.879
Conductividad (mS/cm)	16.735	16.09	16.03	17.105
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	16500	15500	16000	16000
DQO (mg/L)	45100	48450	46050	45450
ST (mg/L)	47980	46045	44445	45825
SVT (mg/L)	25905	23820	25025	24800
AGV'S (mg/L)	2455	2740	2155	2430

Tabla 17. Caracterización final promedio de blancos.

Blancos		
Parámetro	Prueba	
	BL	BS
pH	7.8835	7.7955
Conductividad (mS/cm)	14.54	19.14
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	14250	18000
DQO (mg/L)	40250	53450
ST (mg/L)	42420	51780
SVT (mg/L)	22680	29610
AGV'S (mg/L)	2265	5785

4.6. Producción de biogás

En la figura 8 se muestran los resultados de la producción de biogás para cuando se utilizó el NaOH como agente para acondicionar el pH, mientras en la figura 9 se muestran los resultados cuando se utilizó el CaO. De manera general, las pruebas iniciaron la producción de biogás en las primeras 24 horas, teniendo una diferencia significativa para las pruebas 1 y 4 con respecto a 2 y 3, esto debido a que se tenía más materia orgánica biodisponible a partir de los pretratamientos, la cual fue aprovechada por los consorcios microbianos en la etapa inicial (hidrolítica) (Kumari y col., 2019). Posteriormente la producción de biogás se dividió en tres etapas durante el periodo, las cuales fueron: del día 3 al día 15 la producción de biogás diaria fue en el intervalo de 25 mL-50 mL; del día 15-55 donde la tasa de producción diaria fue de 50 mL a 100 mL, posterior del día 55 la producción de biogás fue disminuyendo hasta el día 62 donde se detuvo la prueba debido a que no existía una producción significativa de biogás.

La prueba con mayor producción de biogás utilizando como agente químico hidróxido de sodio fue la numero 1, en la cual los filtrados fueron ajustado a un pH de 8.5 y una concentración de 20,000 mg DQO/L teniendo una producción de 4900 mL de biogás, así mismo la prueba con menor producción fue la prueba número 4, con una producción de 3888 mL de biogás.

Tabla 18. Producción acumulada de biogás (NaOH).

Prueba	Producción acumulada de biogás (mL)
1	4900
2	3955
3	3938
4	3888

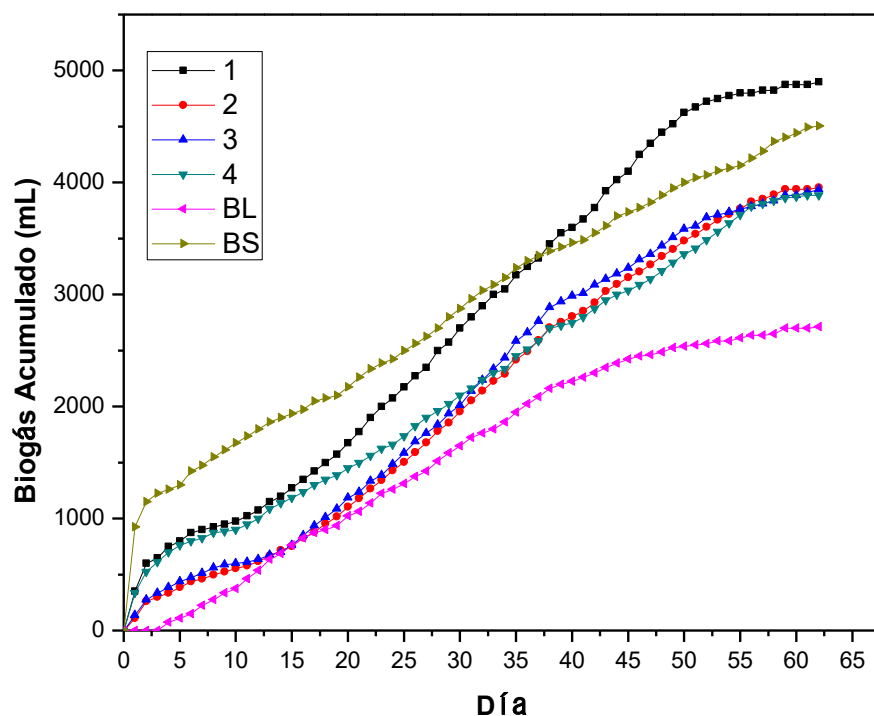


Figura 8. Producción de biogás acumulado (NaOH).

La prueba con mayor producción de biogás utilizando como agente químico óxido de calcio nuevamente fue la número 1, en la cual los filtrados fueron ajustado a un pH de 8.5 y una concentración de 20,000 mg DQO/L teniendo una producción de 4850 mL de biogás con una diferencia menor de 50 mL con respecto a la prueba donde se utilizó hidróxido de sodio, así mismo la prueba con menor producción fue la prueba número 3, con una producción de 4050 mL de biogás.

Tabla 19. Producción acumulada de biogás (CaO).

Prueba	Producción acumulada de biogás (mL)
1	4850

2	4213
3	4050
4	4600

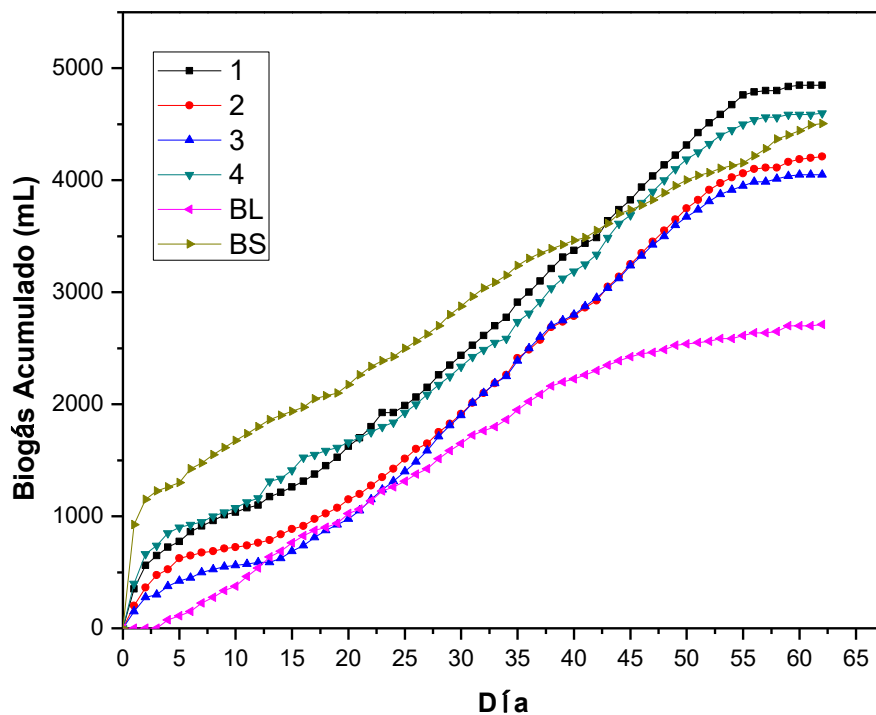


Figura 9. producción de biogás acumulado (CaO).

4.7. Composición del biogás.

La determinación de la composición del biogás producido (Tablas 20 y 21) se obtuvo a partir del promedio de tres determinaciones de la calidad del biogás producido durante los 62 días de duración de la prueba BMP (Anexo 3), obteniendo como resultado para la prueba donde se utilizó como agente químico hidróxido de sodio una composición de metano en los intervalos del 62.9% al 64.7% y del 60.7% al 67.2% para la prueba donde se utilizó como agente químico óxido de calcio (Figuras 10 y 11), los cuales se encuentran dentro de los intervalos reportados en la literatura para los procesos de digestión anaerobia (55% al 70%) (Quesada y col.,2007).

La composición de metano en el biogás producido fue mayor al 60% en las todas las pruebas debido al efecto de los pretratamientos realizados sobre los filtrados generados en la extracción de la fibra de nopal previo al proceso de digestión anaerobia (Karthikeyan y col.,2017), lo cual se comprueba con la composición de metano obtenida del blanco inóculo-filtrados sin pretratamiento de 41.8% (BS) (Tabla 22 y figura 12). Así mismo la atribución del inóculo utilizado dado que se encontraba en óptimas condiciones para el proceso de digestión anaerobia debido al acondicionamiento del mismo (Quiroz y col.,2021).

Tabla 20. Composición de biogás producido (NaOH).

	NaOH							
Prueba	1		2		3		4	
Compuesto	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂
Porcentaje (%)	63.4	36.6	62.9	37.1	63.5	36.5	64.7	35.3

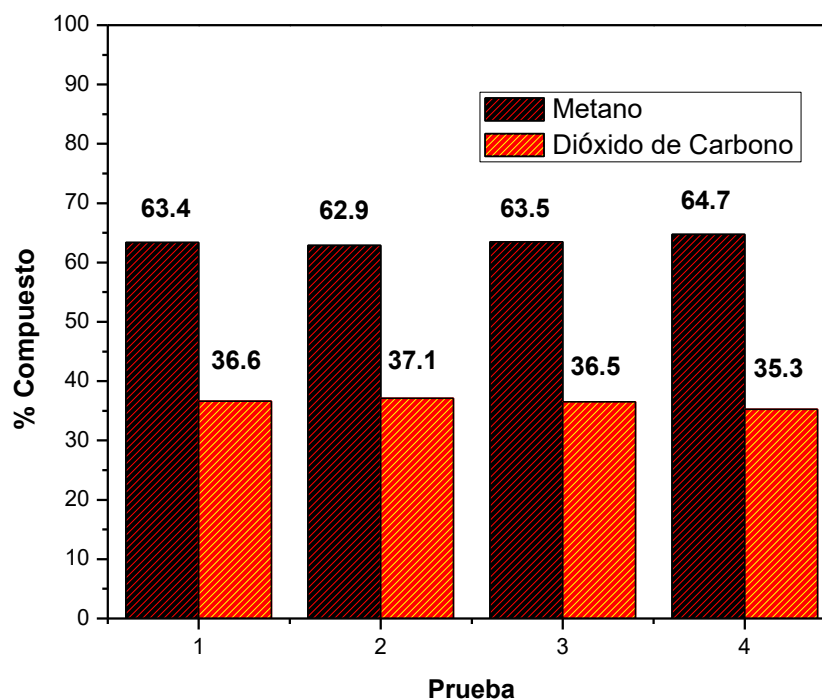


Figura 10. Composición de biogás producido (NaOH).

Tabla 21. Composición de biogás producido (CaO).

	CaO							
Prueba	1		2		3		4	
Compuesto	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂
Porcentaje (%)	64.6	35.4	63.5	36.5	67.2	32.8	60.7	39.3

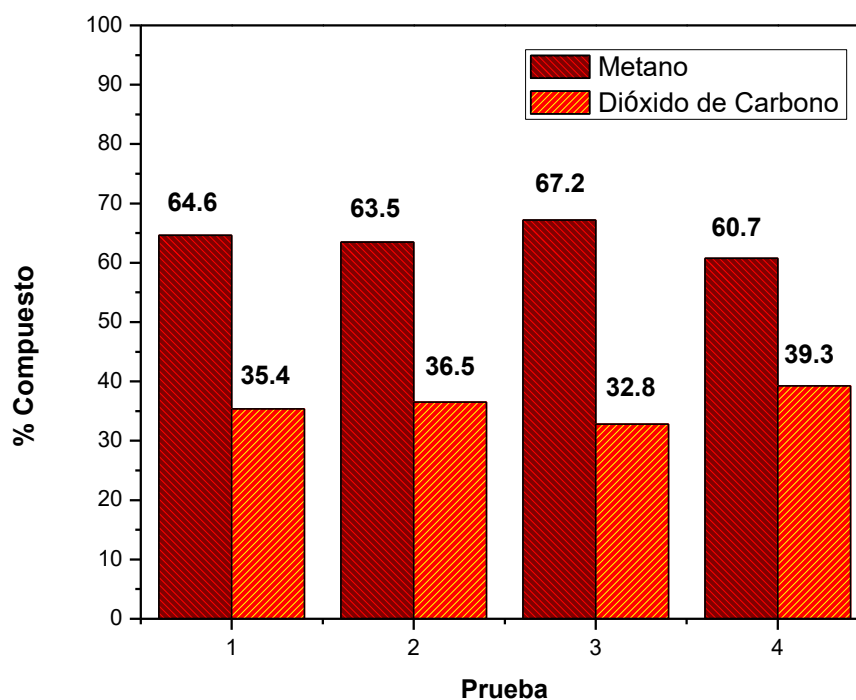


Figura 11. Composición de biogás producido (CaO).

Tabla 22. Composición de biogás producido en blancos.

Composición de blancos				
Prueba	BL		BS	
Compuesto	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂
Porcentaje (%)	75.6	24.4	41.8	58.2

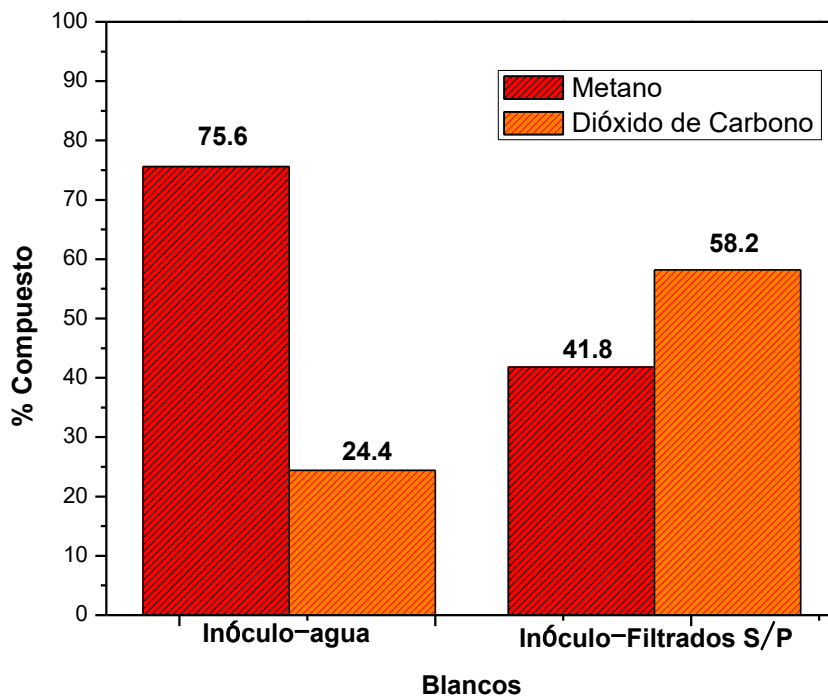


Figura 12. Composición de biogás producido en blancos.

4.8. Producción de metano.

La producción de metano acumulado se calculó a partir de la composición del biogás producido para las diferentes pruebas, así como su producción de biogás acumulado obteniendo las figuras 13 y 14.

La prueba con mayor producción de metano utilizando como agente químico hidróxido de sodio fue la numero 1, en la cual los filtrados fueron ajustado a un pH de 8.5 y una concentración de 20,000 mg DQO/L, teniendo una producción de 3104 mL de metano, así mismo la prueba con menor producción fue la prueba número 2, con una producción de 2487 mL de metano.

Tabla 23. Producción acumulada de metano (NaOH).

Prueba	Producción acumulada de Metano (mL)
1	3104
2	2487
3	2588
4	2516

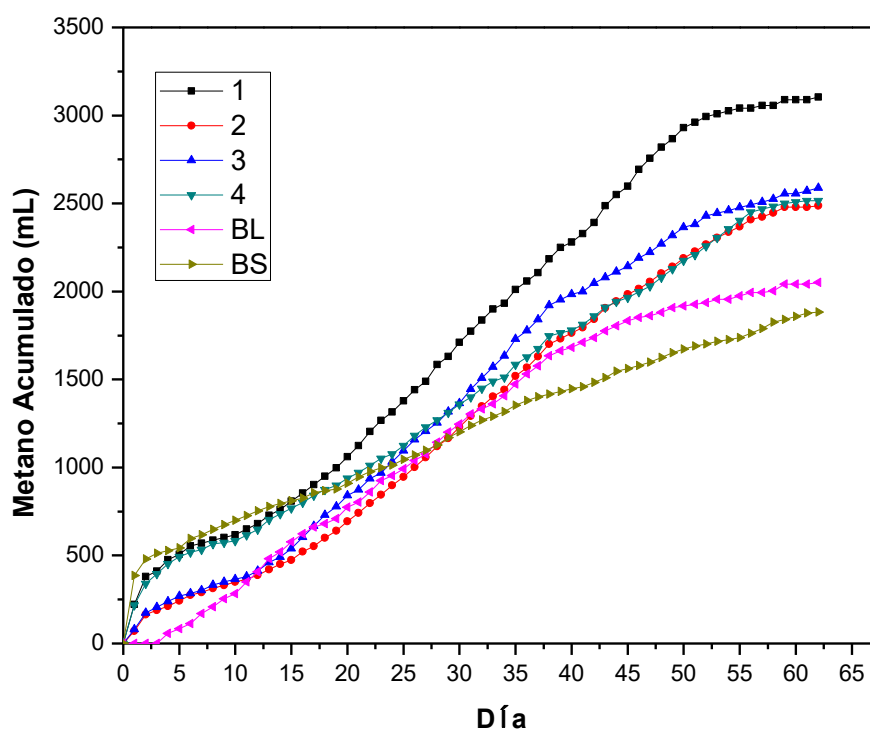


Figura 12. producción acumulada de metano (NaOH).

La prueba con mayor producción de metano utilizando como agente químico óxido de calcio fue la número 1, en la cual los filtrados fueron ajustado a un pH de 8.5 y una concentración de 20,000 mg DQO/L, teniendo una producción de 3134 mL de metano con una diferencia mayor de 30 mL con respecto a la mejor prueba donde se utilizó como agente químico hidróxido de sodio, así mismo la prueba con menor producción fue la prueba número 2, con una producción de 2674 mL de metano.

Tabla 24. Producción acumulada de metano (CaO).

Prueba	Producción acumulada de Metano (mL)
1	3134
2	2674
3	2720
4	2794

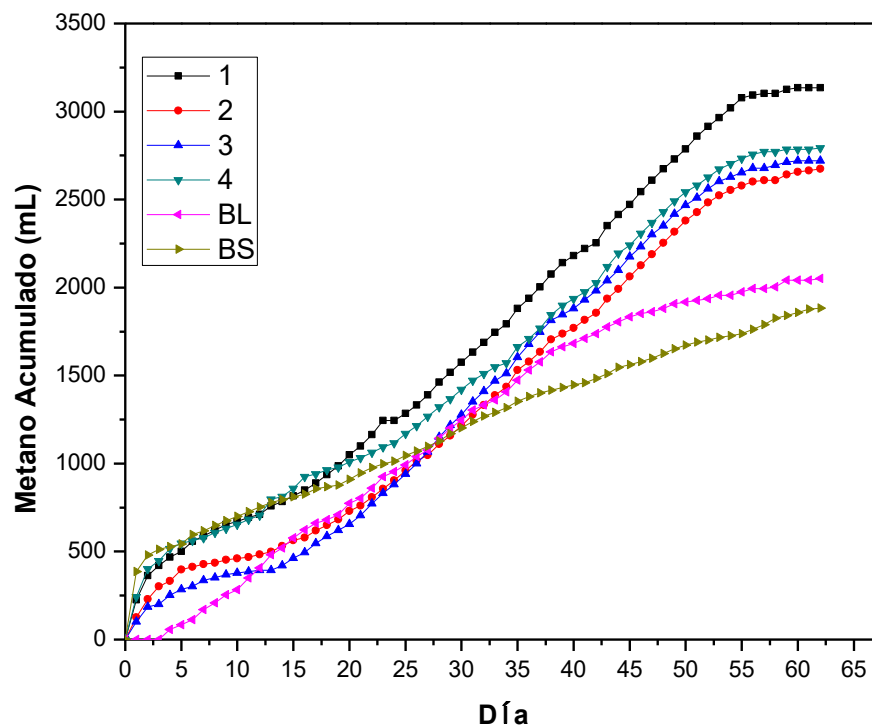


Figura 13. producción acumulada de metano (CaO).

4.9. pH

En las figuras 15 y 16 se observa un pH de las mezclas iniciales en intervalos de 8.03 a 8.35, los cuales son valores que están dentro de los intervalos favorables

(6.5-8.5) para mantener estables los consorcios microbianos (Ferreira, 2013), estos valores iniciales fueron mayores a 8 debido a que predominó el pH del inóculo sobre los valores de los filtrados pretratados por su alto contenido de alcalinidad (Rodríguez y col., 2007), después de finalizar la prueba; los pH's se mantuvieron constantes entre sí con una disminución de 0.49 a 0.16 con respecto a los valores iniciales, el cual no fue un cambio brusco debido a que el sistema contó con la capacidad amortiguadora suficiente para evitar la acidificación del sistema y así mantener un pH favorable para todos los consorcios microbianos.

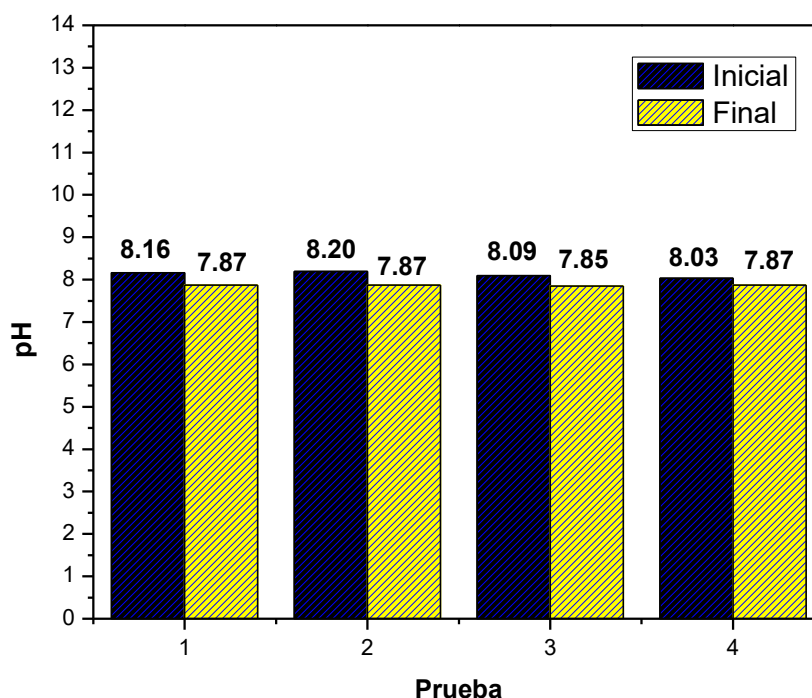


Figura 14. pH inicial y final (NaOH).

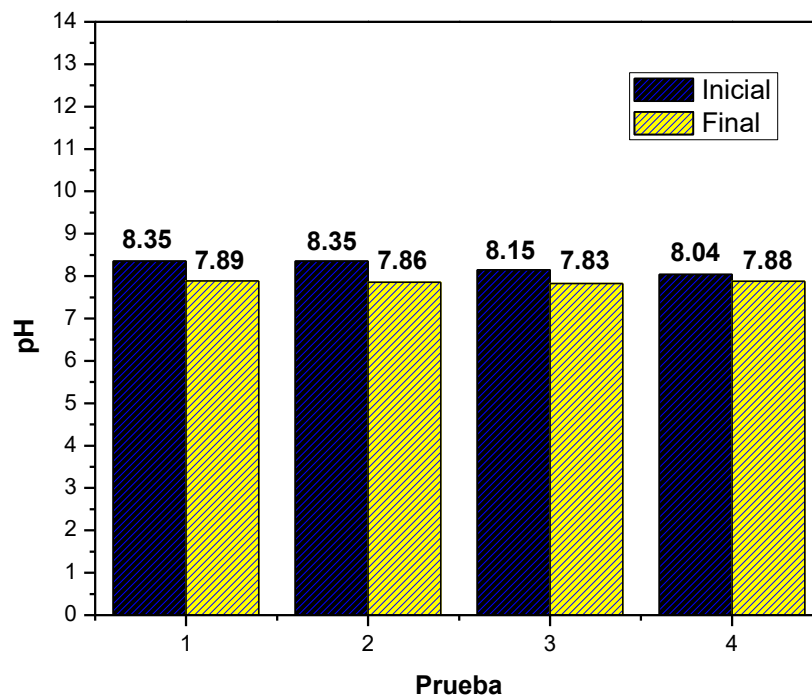


Figura 15. pH inicial y final (CaO).

4.10. Conductividad.

En las figuras 17 y 18 se observa que las mezclas iniciales en las cuales los filtrados se ajustaron a una concentración de 20,000 mg DQO/L (Prueba 1 y 4), tuvieron los valores iniciales más altos de conductividad en un intervalo de 14.915 mS/cm a 15.165 mS/cm con respecto a las mezclas donde los filtrados se ajustaron una concentración de 10,000 mg DQO/L (Prueba 2 y 3), en la cual los valores de conductividad fueron de 14.325 mS/cm a 14.465 mS/cm. Al final de la prueba se tuvo un incremento en los valores de conductividad del 8 % al 13% con respecto a los valores iniciales para las diferentes pruebas. Los valores de conductividad para las pruebas mostradas en las figuras 17 y 18 se encontraron dentro de intervalo recomendado por Ogata y col., (2016), el cual recomienda valores menores a 35 mS/cm en los procesos de digestión anaerobia debido a que la conductividad no tiene efectos negativos en la degradación del sustrato o residuo, así como en la inhibición en la producción de metano.

La adición de los diferentes agentes químicos para el pretratamiento en los filtrados, no tuvo un reflejo significativo en los valores de conductividad para las diferentes pruebas. Por ejemplo; la prueba número uno donde se utilizó como agente químico hidróxido de sodio tuvo una conductividad inicial y final de 15.145 mS/cm y 16.69 mS/cm respectivamente, teniendo una diferencia de 0.15 mS/cm y 0.045 mS/cm con respecto a la conductividad inicial y final para la prueba donde se utilizó como agente químico óxido de calcio.

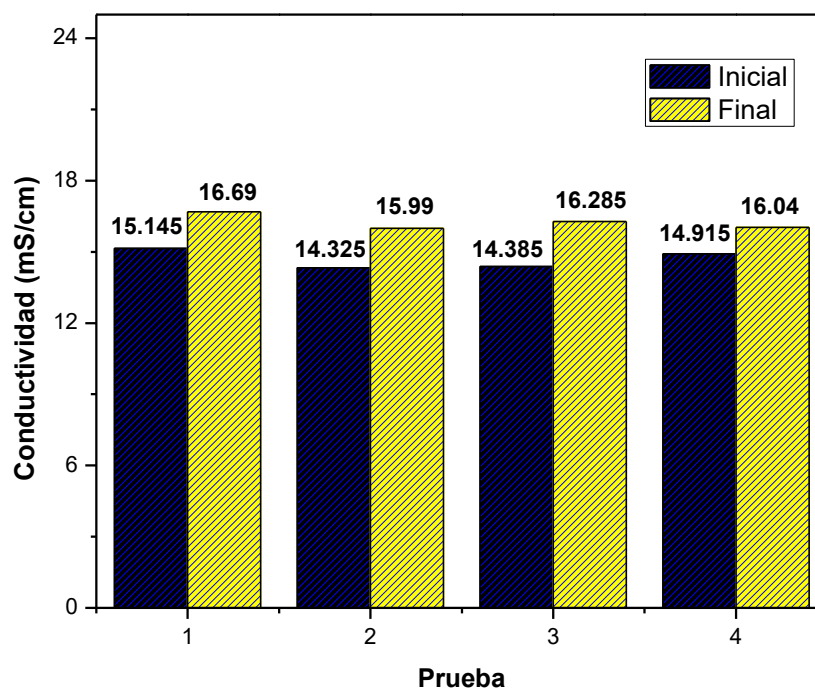


Figura 16. Conductividad inicial y final (NaOH).

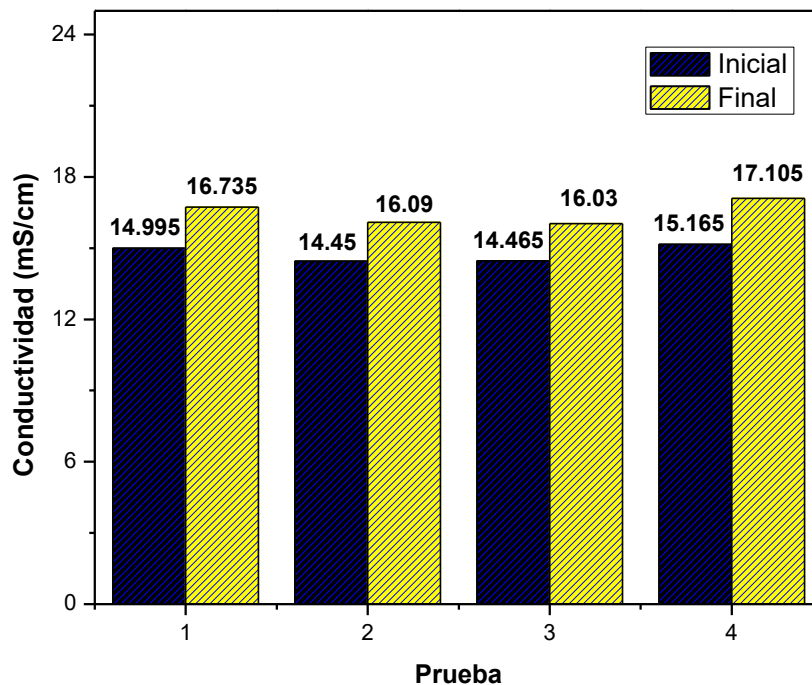


Figura 17. Conductividad inicial y final (CaO).

4.11. Alcalinidad.

La alcalinidad es un parámetro de suma importancia debido a que representa una medida de la capacidad de neutralizar la acidez del medio. Al observar las figuras 19 y 20, se aprecia que la mayoría de los valores iniciales y finales para las diferentes pruebas se encuentran dentro de los valores de trabajo recomendados (en el intervalo de 5,000 a 18,000 mg/L) según Tchobanoglous y col., (1994). Las pruebas 2 y 3 donde se utilizó hidróxido de sodio, así como todas las pruebas donde se utilizó óxido de calcio presentaron una disminución o consumo de alcalinidad al final de la prueba BMP, debido a la alta producción de Agv's durante la etapa acidogénica. Para las pruebas 1 y 4 con hidróxido de sodio se tuvo una producción de alcalinidad debido probablemente a la disociación del dióxido de carbono con el hidróxido de sodio, aumentando el contenido de carbonatos y a su vez la capacidad amortiguadora del sistema (Cajigas y col., 2010). Las figuras 19 y 20 muestran altos

valores de alcalinidad los cuales se recomiendan tener para obtener buena estabilidad en el digestor.

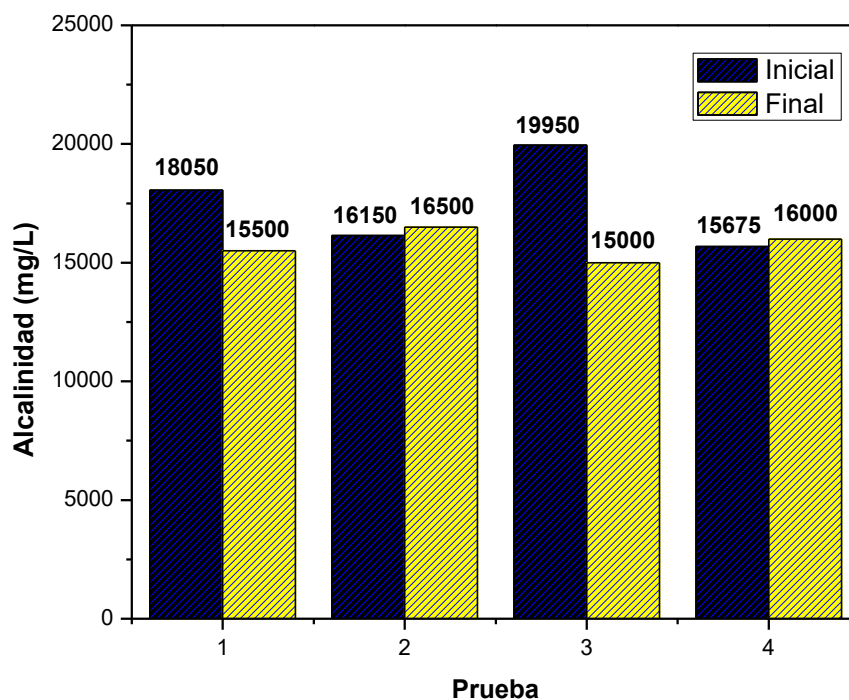


Figura 18. Alcalinidad inicial y final (NaOH).

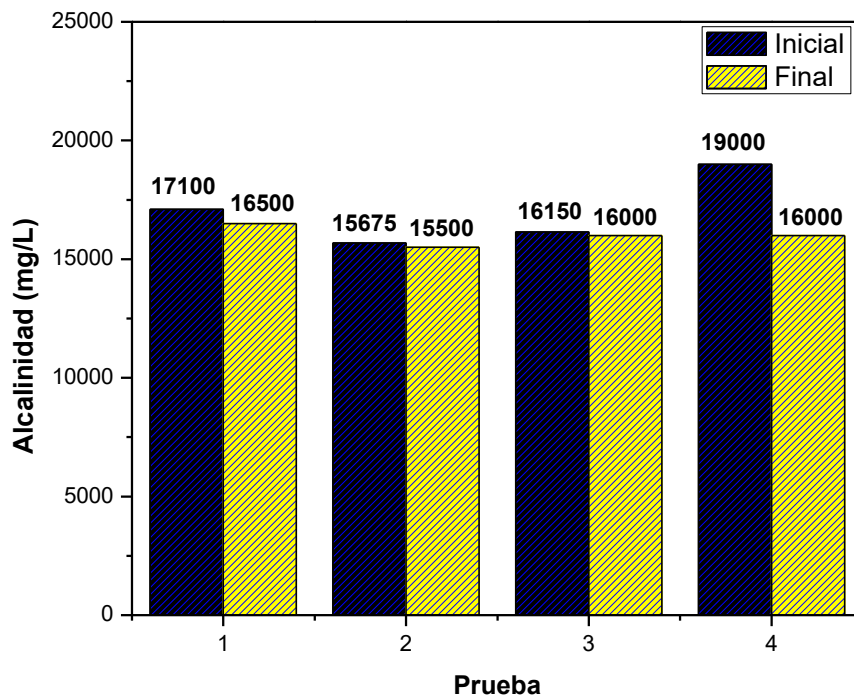


Figura 19. Alcalinidad inicial y final (CaO).

4.12. Ácidos Grasos Volátiles (AGV's)

Las figuras 21 y 22 muestran valores iniciales de AGV's globales en los intervalos de 3232.5 mg/L a 4120 mg/L sobrepasando las concentraciones recomendadas de 1500 mg/L a 2000 mg/L (Garcia,2012), esto debido a que los filtrados e inóculo contaban con un alto contenido de AGV's iniciales, sin embargo, Alanis, 2017 menciona que pueden existir valores de AGV's menores a 5000 mg/L en el sistema teniendo un control de pH para evitar la inhibición. Posterior a la prueba BMP, la cantidad de AGV's en el sistema tuvo una disminución o consumo debido al aprovechamiento de los mimos para la producción de biogás por los diferentes consorcios microbianos, teniendo valores finales en intervalos de 2065 mg/L a 2740 mg/L.

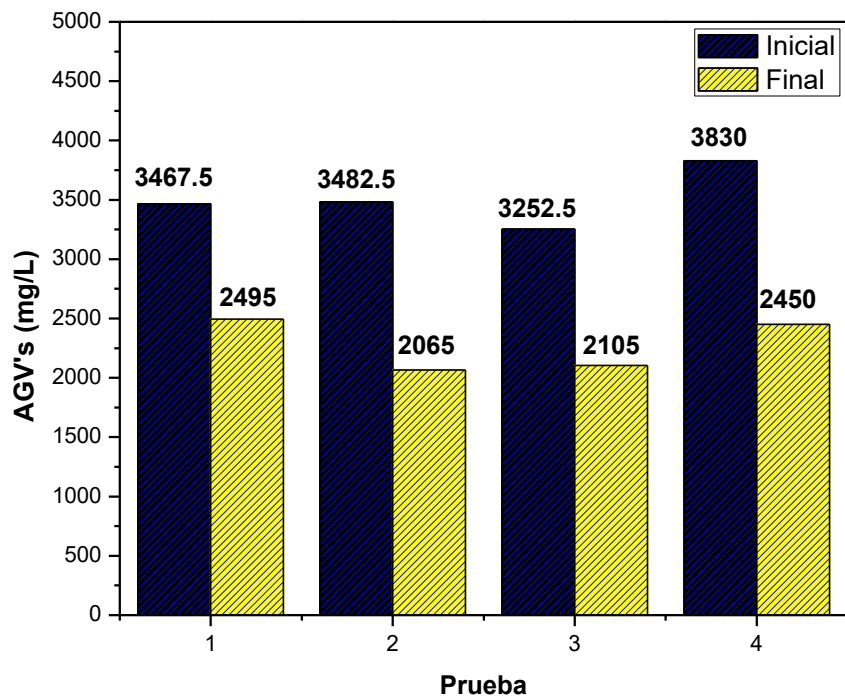


Figura 20. AGV's iniciales y finales (NaOH).

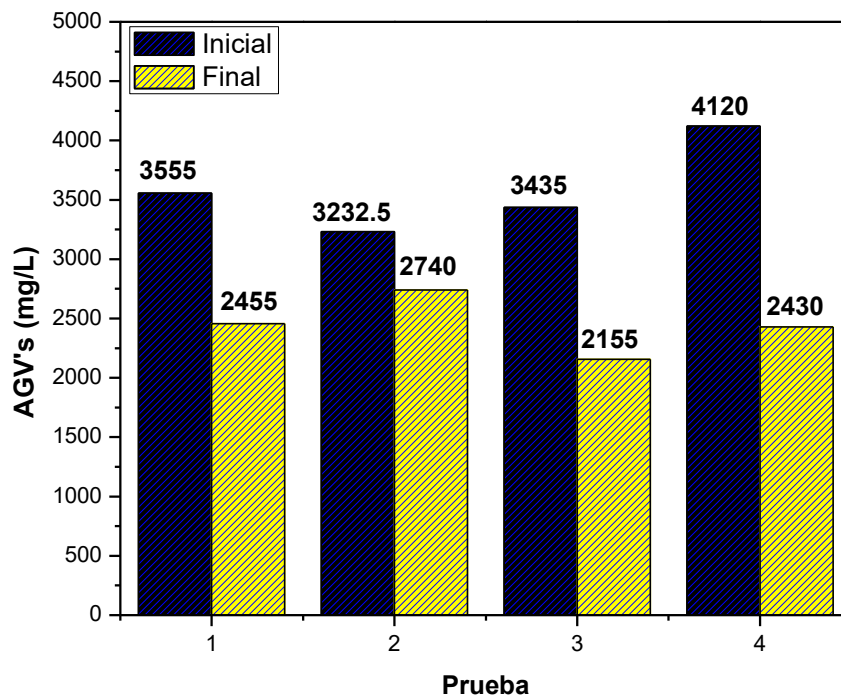


Figura 21. AGV's iniciales y finales (CaO).

4.13. Demanda química de Oxígeno (DQO)

Las determinaciones de la demanda química de oxígeno para las mezclas iniciales se realizaron por balances de materia, teniendo en cuenta que los filtrados alimentados para las pruebas número 1 y 4 se ajustaron a una concentración de 20,000 mg/L y las pruebas 2 y 3 a una concentración de 10,000 mg/L obteniendo una DQO en la mezcla inicial de 75,100 mg/L y 70,100 mg/L respectivamente. Posterior a la prueba BMP, se tuvo una disminución de DQO debido a que fue consumida por los diferentes microorganismos para la producción de biogás (Sandoval,2020) en intervalos de 21,250 mg/L a 30,000 mg/L (Figuras 23 y 24).

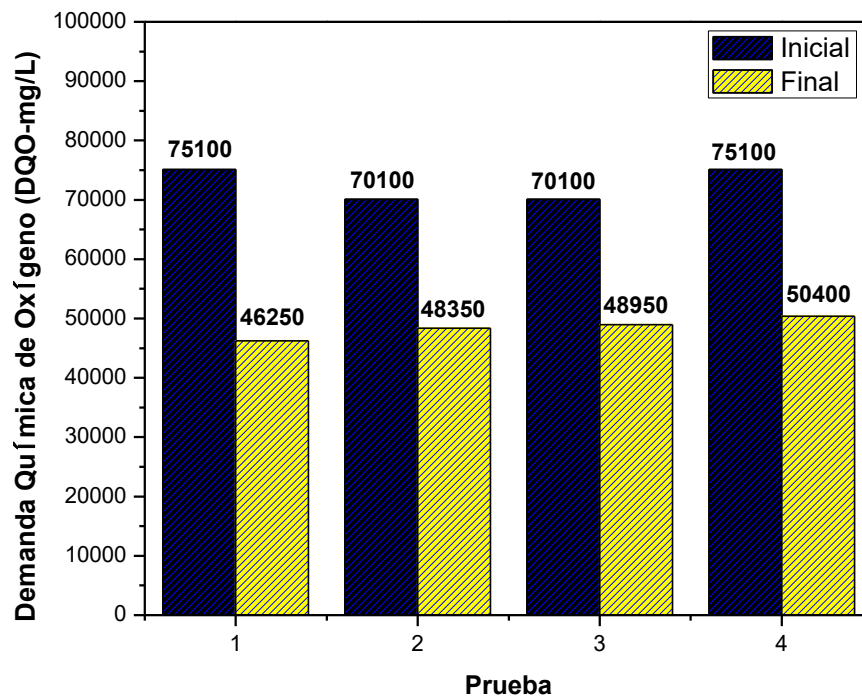


Figura 22. Demanda Química de Oxígeno inicial y final (NaOH).

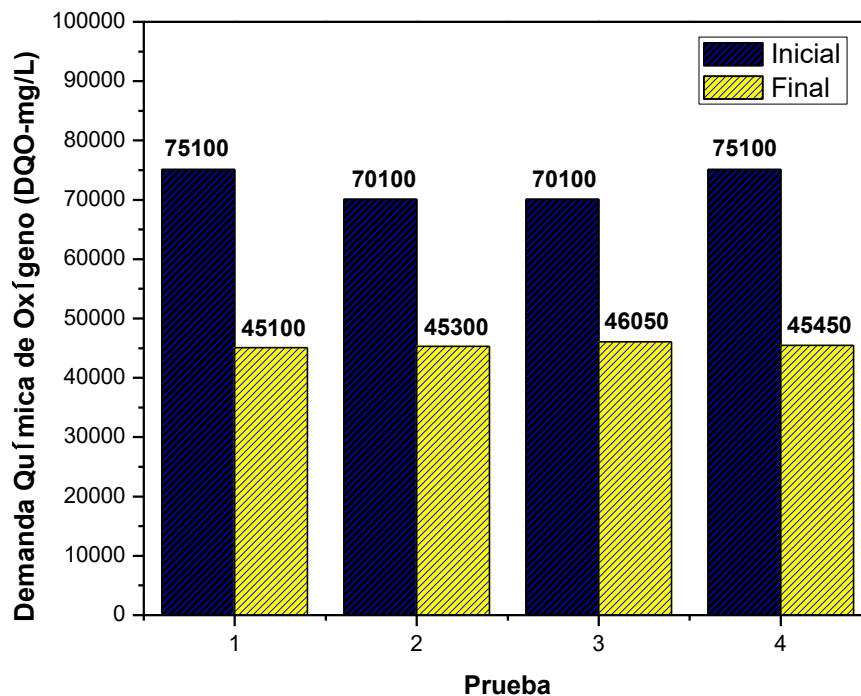


Figura 23. Demanda Química de Oxígeno inicial y final (CaO).

La concentración de la demanda química de oxígeno consumida de filtrados durante la prueba BMP se muestra en las tablas 25 y 26 para los diferentes agentes químicos utilizados, obteniendo los mayores consumos para las pruebas donde los filtrados se ajustaron a una concentración inicial de 20,000 mg/L debido a que se tenía mayor materia orgánica disponible para ser aprovechada por los consorcios microbianos.

Tabla 25. Demanda Química de Oxígeno consumida (NaOH).

Agente Químico: NaOH			
Prueba	DQO (mg DQO/L)		
	Inicial	Consumida	Final
1	20000	8020	11980
2	10000	5180	4820
3	10000	4940	5060
4	20000	6360	13640

Tabla 26. Demanda Química de Oxígeno consumida (CaO).

Agente Químico: CaO			
	DQO (mg DQO/L)		
Prueba	Inicial	Consumida	Final
1	20000	8480	11520
2	10000	6400	3600
3	10000	6100	3900
4	20000	8340	11660

4.14. Sólidos Totales (ST)

En las figuras 25 y 26 se presenta la concentración de sólidos totales (ST) iniciales y finales de la prueba BMP, las cuales permiten estimar la cantidad de materia disuelta y suspendida en el sistema, teniendo valores iniciales en los intervalos de 58,685 mg/L a 70,060 mg/L. Posterior a la prueba BMP se tuvieron concentraciones de 43,060 mg/L a 47,980 mg/L, teniendo los siguientes porcentajes de sólidos totales consumidos durante la prueba BMP utilizando hidróxido de sodio y óxido de calcio respectivamente; 31.8% y 23.6% para la prueba número 1, 35.5% y 26.6% para la prueba número 2, 24.5% y 33.8% para la prueba número 3, 30.8% y 34.6% para la prueba número 4, siendo consumida menos del 40 % de la materia suspendida y disuelta contenida en el sistema.

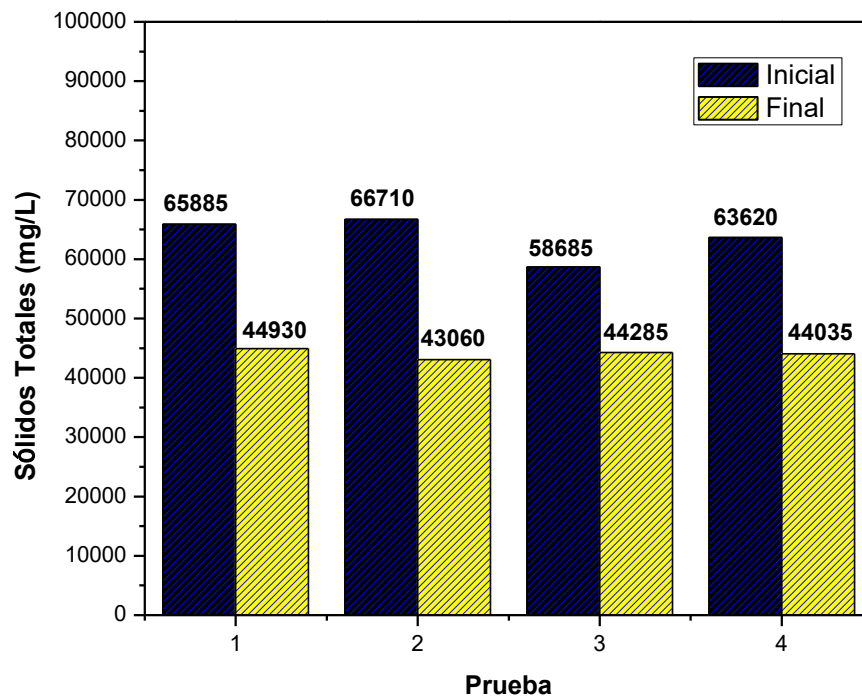


Figura 24. Sólidos Totales iniciales y finales (NaOH).

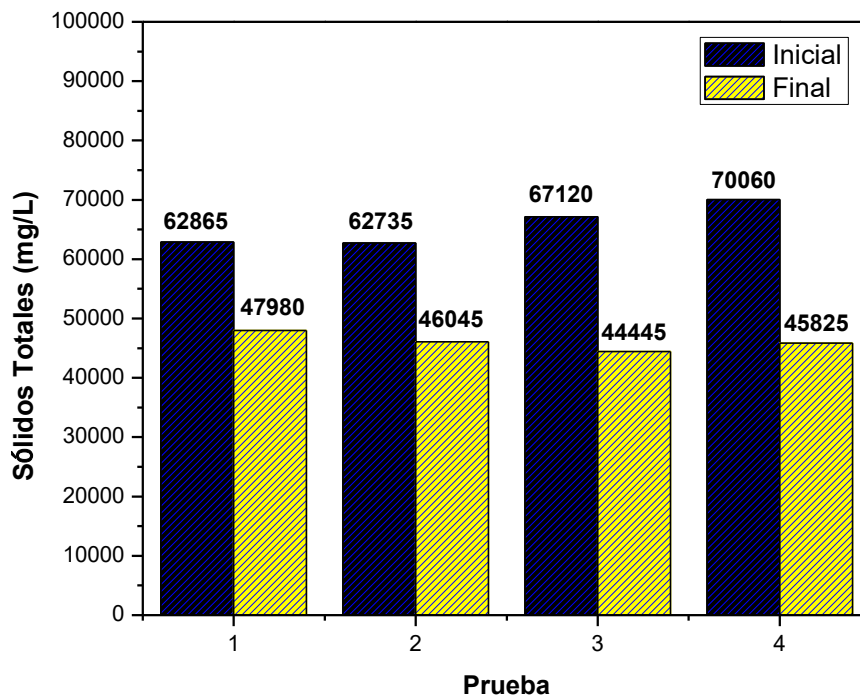


Figura 25. Sólidos Totales iniciales y finales (CaO).

4.15. Sólidos Volátiles Totales (SVT)

Las figuras 27 y 28 muestran los valores iniciales y finales de sólidos volátiles totales (SVT) para la prueba BMP donde se utilizaron como agentes químicos hidróxido de sodio y óxido de calcio, cuyos valores iniciales se encontraron en un intervalo inicial de 33,785 mg/L a 36,365 mg/L y 35,090 mg/L a 39,560 mg/L respectivamente, cuantificando de manera indirecta la materia orgánica presente de la mezcla inóculo-filtrados. Posterior a la prueba BMP se tuvieron valores en los intervalos 23,120 mg/L a 25,905 mg/L, teniendo los siguientes porcentajes de sólidos volátiles totales consumidos durante la prueba utilizando hidróxido de sodio y óxido de calcio respectivamente; 33.2% y 33.9% para la prueba 1, 36.4% y 32.1 % para la prueba 2, 31% y 31.8% para la prueba 3, 32.6 % y 37.3 % para la prueba 4, teniendo más del 60% de la materia orgánica alimentada sin degradar.

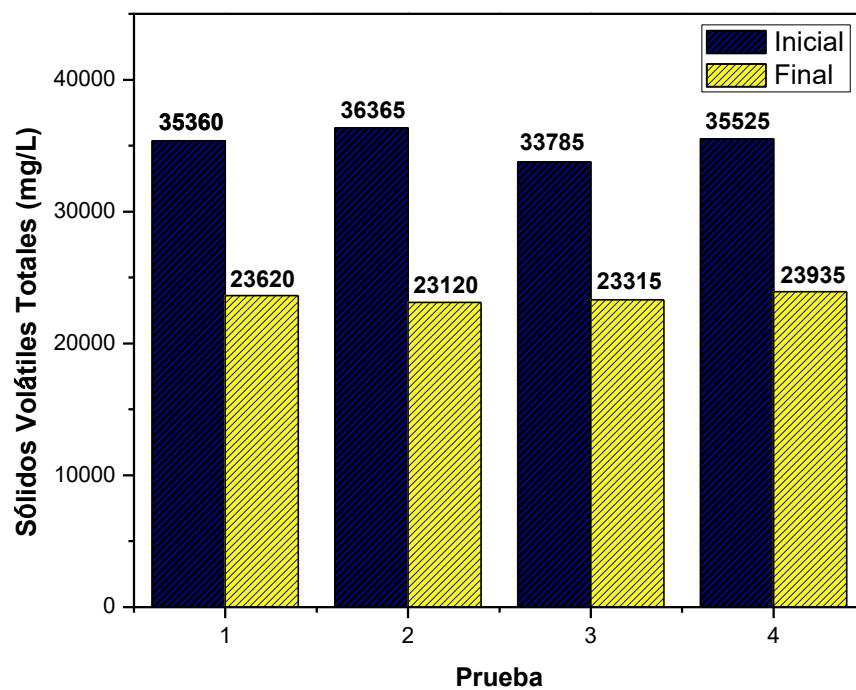


Figura 26. Sólidos Volátiles Totales iniciales y finales (NaOH).

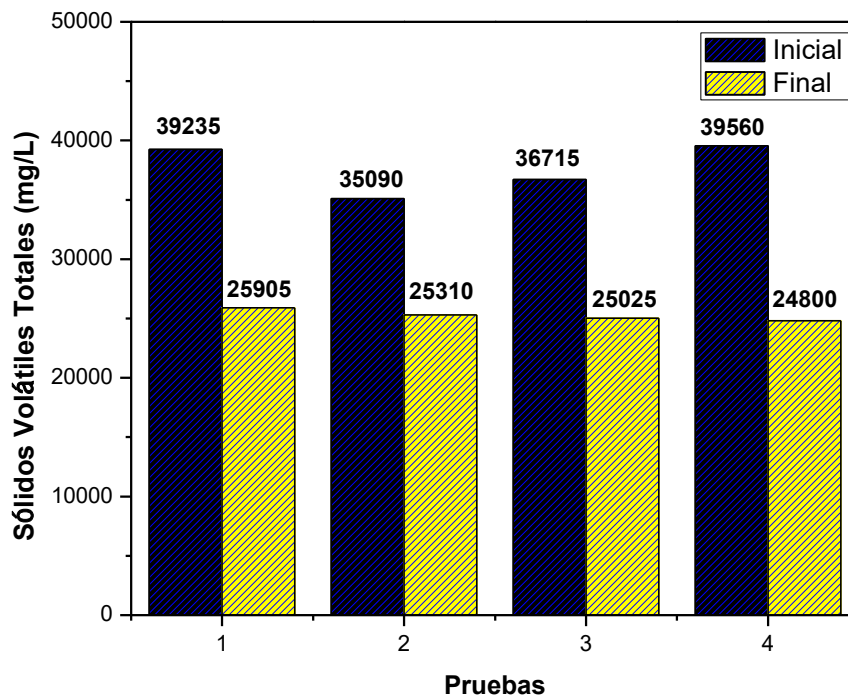


Figura 27. Sólidos Volátiles Totales iniciales y finales (CaO).

4.16. Rendimientos

Los rendimientos de metano por gramo de DQO consumidos se muestran en la figura 29, donde se observa que los mejores rendimientos se obtuvieron en la prueba número 1, en la cual los filtrados se ajustaron a un pH de 8.5 y una concentración de 20,000 mg/L, teniendo un rendimiento para la prueba donde se utilizó hidróxido de sodio y óxido de calcio de 131.4 y 127.8 mL CH₄/g DQO consumido, con una diferencia del 2.8%. La prueba donde se obtuvo el menor rendimiento fue la número 4, donde los filtrados se ajustaron a un pH de 6.5 y una concentración de 20,000 mg/L, teniendo un rendimiento de 73.2 y 89.1 para las pruebas donde se utilizó hidróxido de sodio y óxido de calcio respectivamente (anexo 2).

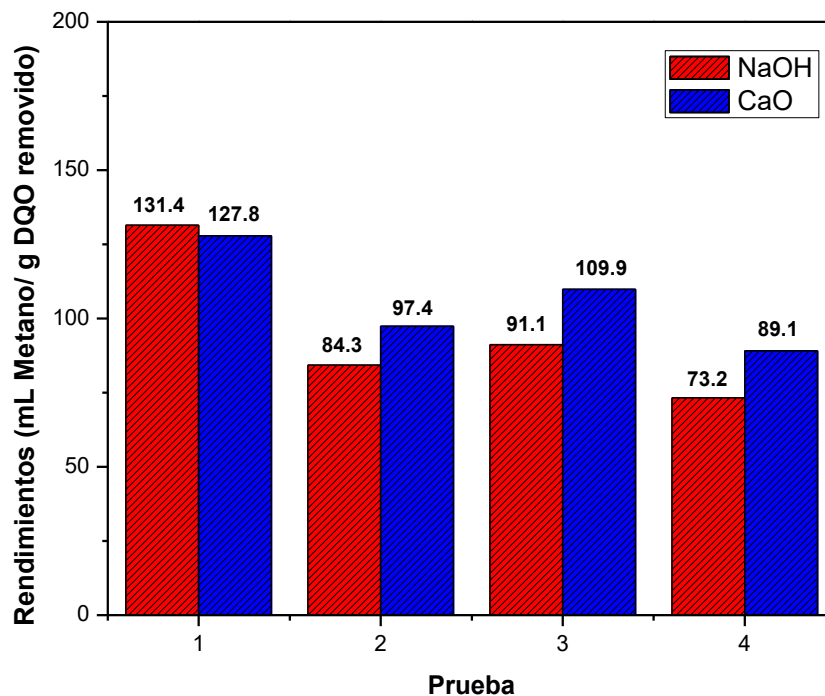


Figura 28. Rendimientos

4.17. Análisis estadístico del diseño experimental

Una vez terminada la parte experimental se realizó el análisis del diseño de experimentos Taguchi L₄ con el programa de cómputo Minitab 19®, a partir de los efectos de los pretratamientos en los filtrados sobre la producción de metano en las pruebas BMP.

4.17.1. Respuesta para las relaciones de señal a ruido

Las tablas de respuesta muestran el promedio de cada característica de respuesta para cada nivel de cada factor. Las tablas incluyen intervalos basados en estadísticos Delta, los cuales comparan la magnitud relativa de los efectos. El

estadístico Delta es el mayor menos el menor promedio para cada factor, siendo el intervalo más alto con respecto al efecto causado en la producción de metano; donde se obtiene el valor delta mayor; para el caso de la prueba donde se utilizó hidróxido de sodio se obtuvo que el pretratamiento químico tuvo mayor efecto en la relación S/N con respecto al pretratamiento de concentración (Tabla 27). Para la prueba donde se utilizó óxido de calcio se obtuvo que el pretratamiento de concentración tuvo mayor efecto en la relación S/N con respecto al pretratamiento químico (Tabla 28)

Tabla 27. Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido (NaOH).

Nivel	pH	DQO
1	67.80	67.84
2	68.87	68.82
Delta	1.07	0.98
Clasificar	1	2
Mas grande es mejor		

Tabla 28. Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido (CaO).

Nivel	pH	DQO
1	68.76	68.62
2	69.22	69.36
Delta	0.46	0.75
Clasificar	2	1
Mas grande es mejor		

4.17.2. Efectos principales para las relaciones S/N

En los resultados obtenidos de efectos principales para relaciones S/N en la producción de metano, se observa que los niveles más alto del diseño experimental (pH=8.5 y concentración= 20,000 mg DQO/L) fueron los que tuvieron mayor efecto sobre la relación S/N respecto a los niveles bajo del diseño (pH=6.5 y Concentración= 10,000 mg DQO/L). La Figura 30 muestra la gráfica de efectos

principales para la prueba donde se utilizó hidróxido de sodio; donde se observa que la pendiente para cada factor es similar, el cual indica que los dos factores tuvieron un efecto similar en la producción de metano. Para la prueba donde se utilizó óxido de calcio (Figura 31), se obtuvo que existe una diferencia de la pendiente obtenida para cada factor del diseño experimental, teniendo la mayor pendiente el pretratamiento de concentración; el cual nos indica que tuvo mayor efecto en la producción de metano con respecto al pretratamiento químico.

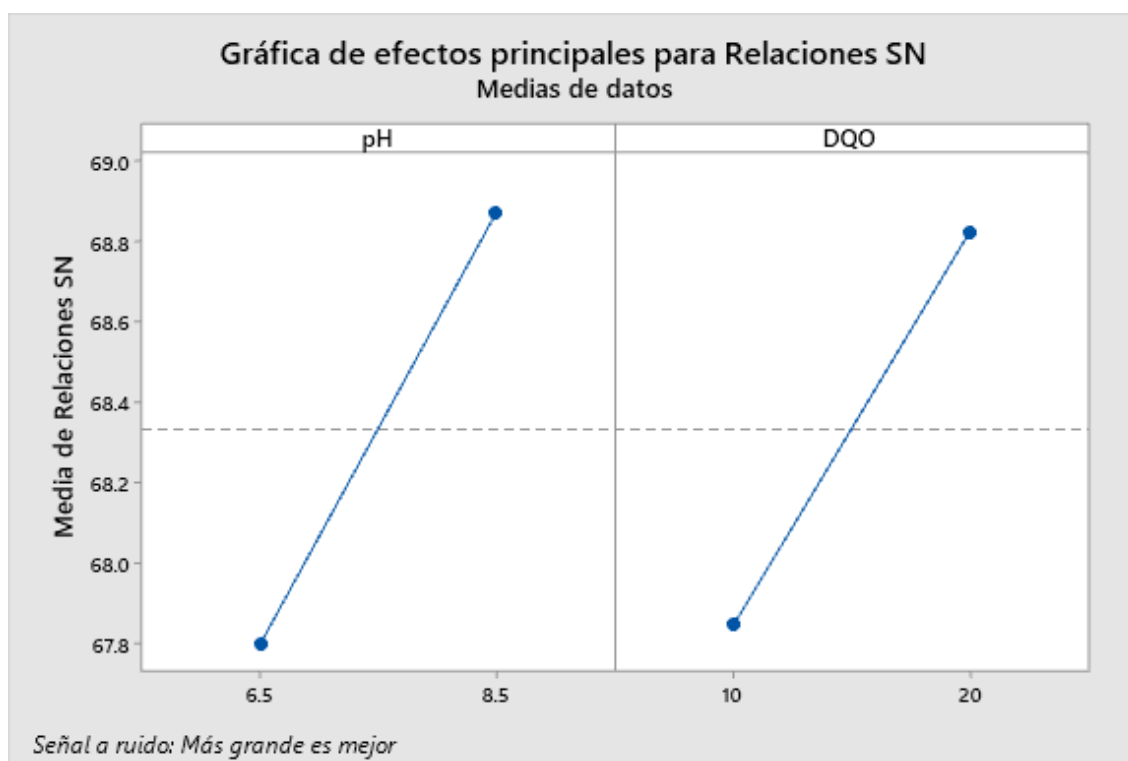


Figura 29. Gráfica de efectos principales para relaciones S/N (NaOH).

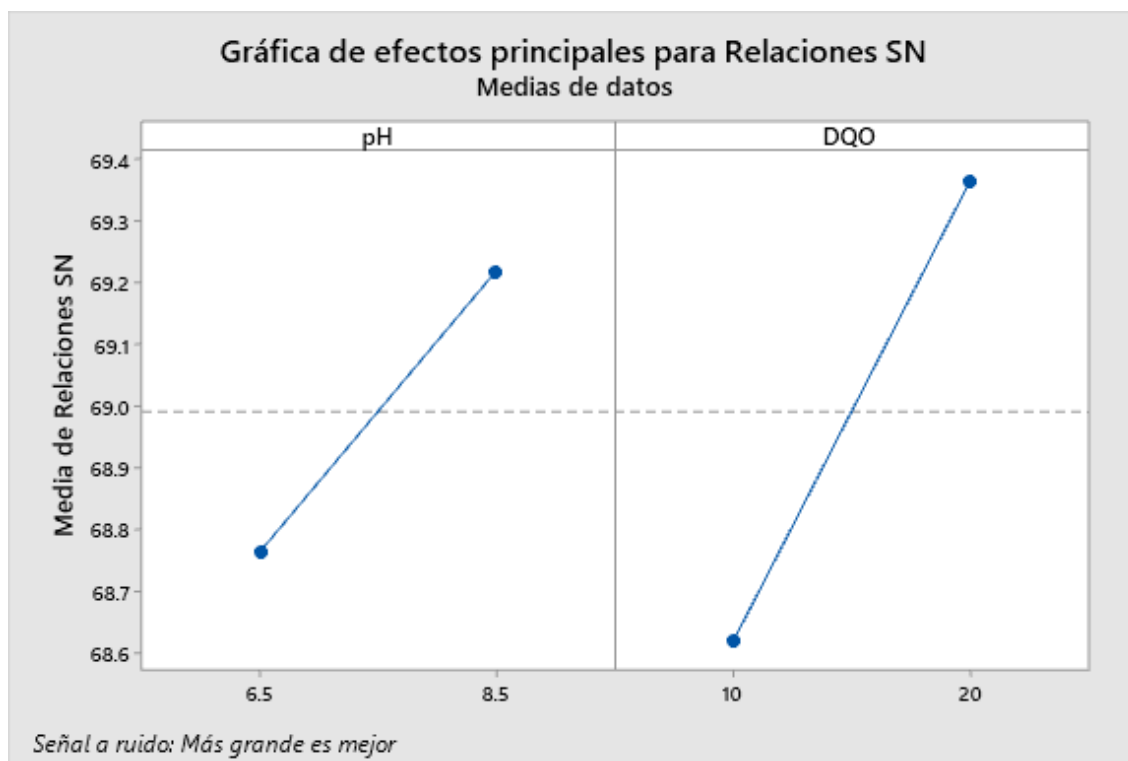


Figura 30. Gráfica de efectos principales para relaciones S/N (CaO).

4.17.3. Respuestas para medias

Las tablas 29 y 30 muestran los análisis para las medias en las pruebas donde se utilizaron hidróxido de sodio y óxido de calcio respectivamente, donde se observa que el valor mayor en el parámetro delta se obtuvo en el pretratamiento de concentración, el cual nos indica que tuvo mayor efecto en la producción de metano con respecto al pretratamiento de químico para el análisis de medias, este resultado difiere con lo obtenido para el análisis de respuesta para las relaciones S/N con respecto al hidróxido de sodio, pero confirma que el parámetro con mayor efecto es el pretratamiento de concentración para el caso donde se utilizó óxido de calcio.

Tabla 29. Tabla de respuesta para medias (NaOH).

Nivel	pH	DQO
1	2488	2474
2	2797	2811

Delta	309	337
Clasificar	2	1

Tabla 30. Tabla de respuesta para medias (CaO).

Nivel	pH	DQO
1	2757	2698
2	2904	2962
Delta	147	264
Clasificar	2	1

Las figuras 32 y 33 muestran el análisis para los efectos principales para medias donde se utilizaron hidróxido de sodio y óxido de calcio respectivamente, donde se observa nuevamente que los factores altos del diseño experimental (pH=8.5 y concentración= 20,000 mg DQO/L) ejercen el mayor efecto en la producción de metano.

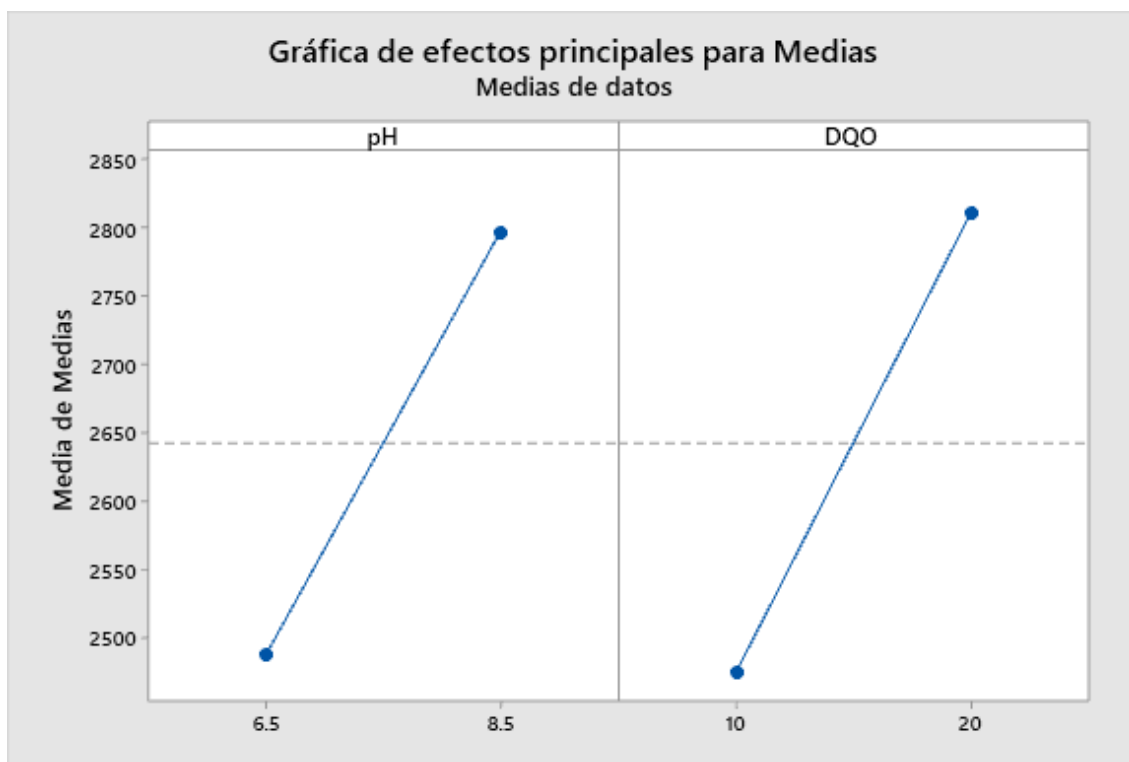


Figura 31. Gráfica de efectos principales para medias (NaOH).

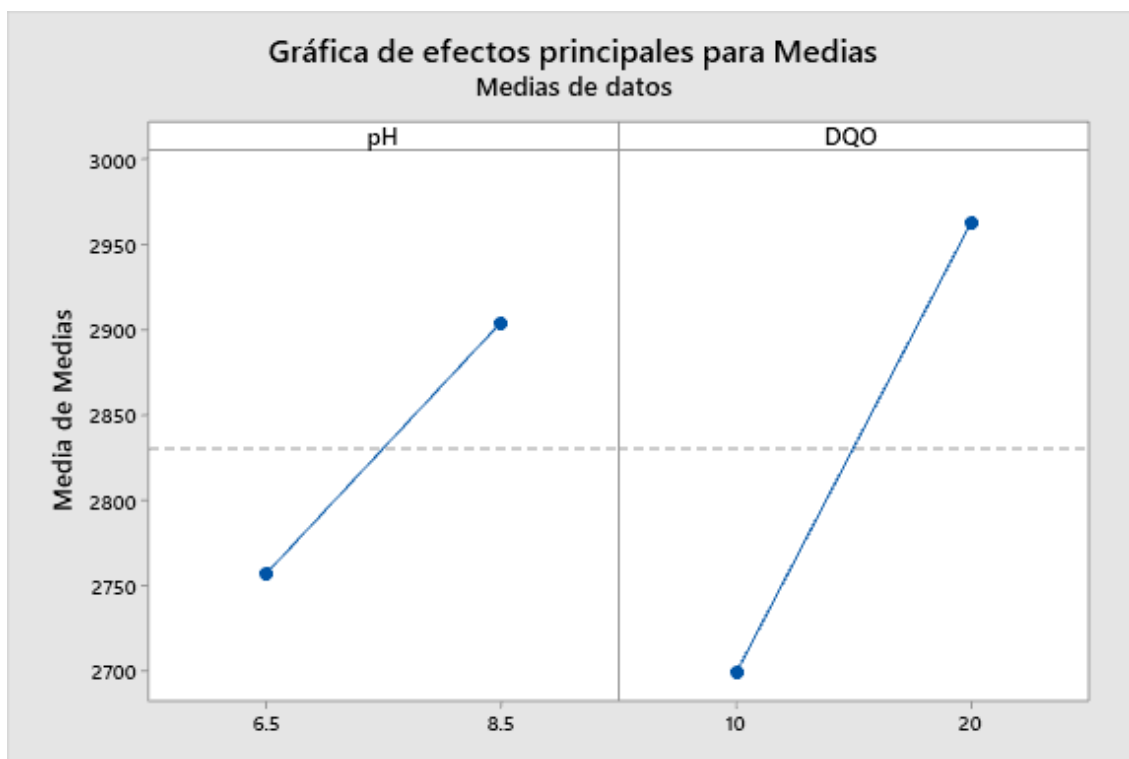


Figura 32. Gráfica de efectos principales para medias (CaO).

4.17.4. Interacción para medias

Las figuras 34 y 35 muestra las interacciones entre los pretratamientos de concentración y químico que existieron en la prueba donde se utilizó hidróxido de sodio y oxido de calcio respectivamente; donde se observa mayor interacción para la producción de metano a una concentración de 20,000 mg DQO/L y pH de 8.5 debido a que las pendientes son mayores respecto a los valores bajos del diseño experimental.

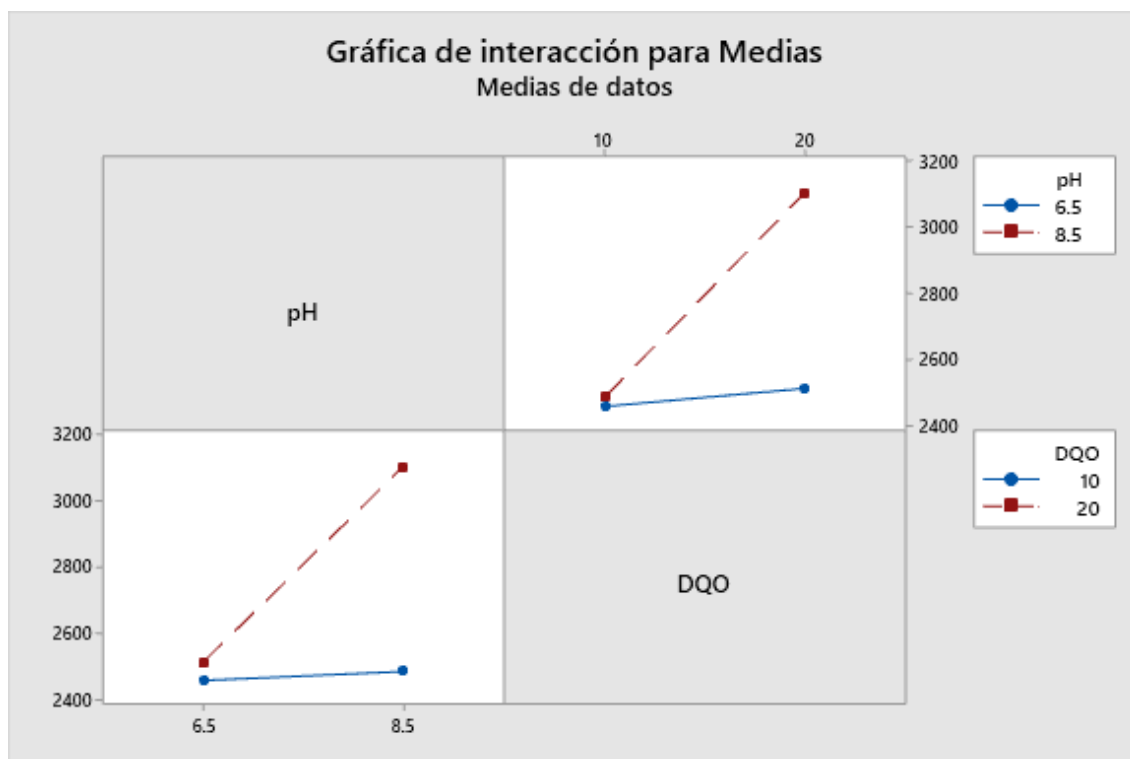


Figura 33. Gráfica de interacción para medias (NaOH).

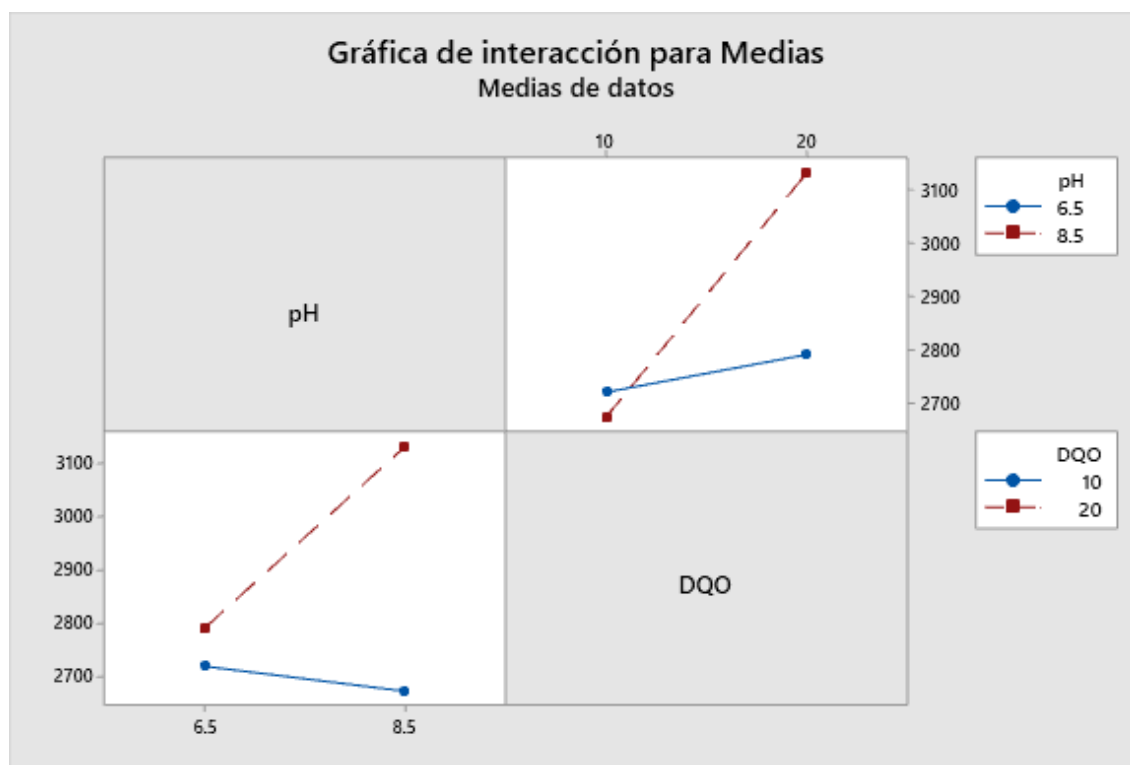


Figura 34. Gráfica de interacción para medias (CaO).

4.17.5. Análisis Fisher

Se realizó el análisis Fisher para obtener la mejor prueba para la producción de metano utilizando hidróxido de sodio y óxido de calcio con una confianza del 95%; obteniendo como resultado la tabla 31. Donde se observa que la mejor prueba es la número 1 y 5 debido a que son las pruebas que se agruparon con la letra A, estas pruebas corresponden a los filtrados ajustados a una concentración de 20,000 mg DQO/L y a un pH de 8.5.

Tabla 31. Agrupación de información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza del 95%.

Prueba	N	Media	Agrupación	
5	2	3133	A	
1	2	3106.6	A	
8	2	2792	A	B
7	2	2721.6	A	B
6	2	2674.9	A	B
4	2	2515		B
2	2	2487.7		B
3	2	2461		B

4.17.6. Prueba t

Las tablas 32 y 33 muestran los valores de la prueba estadística t utilizando como referencia la producción de metano para el agente químico hidróxido de sodio y óxido de calcio, realizando la comparativa de las pruebas 1,2,3 y 4 con respecto al testigo donde no se realizó ningún pretratamiento a los filtrados alimentados, así mismo se realizó la comparativa entre las diferentes pruebas obteniendo las siguientes conclusiones:

- Las pruebas 1,2 y 3 resultaron mejores, con una confianza del 95%, con respecto al testigo sin pretratamiento en los filtrados alimentados, lo cual no sucedió en la prueba 4 donde no existió una diferencia estadísticamente significativa con respecto al testigo.

- Las pruebas para las cuales no existió una diferencia estadísticamente significativa con respecto a una prueba u otra con hidróxido de sodio fueron; Prueba 4 con respecto a la prueba 1, pruebas 3 y 4 con respecto a la prueba 2, prueba 2 y 4 con respecto a la prueba 3 y las pruebas 1,2 y 3 con respecto a la prueba 4.
- Para las pruebas donde se utilizó como agente químico óxido de calcio, no existió una diferencia estadísticamente significativa entre sí, debido a que los valores estadísticos t fueron menores a los valores t de tablas para una confianza del 95% y 2 grados de libertad.

Tabla 32. Prueba estadística t para los tratamientos con NaOH.

	Pretratamientos		Producción	Valores estadísticos t				
Prueba	pH	DQO (mg/L)	Metano (mL)	P vs Testigo	t (1vs)	t(2vs)	t(3vs)	t(4vs)
1	8.5	20,000	3106.600	17.521	-	5.572	4.551	1.838
2	8.5	10,000	2487.700	6.311	5.572	-	0.173	0.084
3	6.5	10,000	2460.600	4.430	4.551	0.173	-	0.161
4	6.5	20,000	2515.200	1.995	1.838	0.084	0.161	-
Testigo			1883.190					
GL			2.000					
t estándar (5%)			4.303					

Tabla 33. Prueba estadística t para los tratamientos con CaO.

	Pretratamientos		Producción	Valores estadísticos t				
Prueba	pH	DQO (mg/L)	Metano (mL)	P vs Testigo	t (1vs)	t(2vs)	t(3vs)	t(4vs)
1	8.5	20,000	3132.777	9.410	-	3.249	3.073	2.358
2	8.5	10,000	2674.938	12.608	3.249	-	0.719	0.682

3	6.5	10,000	2721.600	18.817	3.073	0.719	-	0.897
4	6.5	20,000	2792.200	3.961	1.300	0.500	0.307	-
Testigo			1883.190					
GL			2.000					
t estándar (5%)			4.303					

De acuerdo con el análisis Fisher (Tabla 31) presentado se obtuvo que las mejores pruebas para la producción de metano utilizando hidróxido de sodio y óxido de calcio fueron donde los filtrados se ajustaron a una concentración de 20,000 mg/L y un pH de 8.5, por lo cual se realizó la prueba estadística t en estas dos pruebas donde se concluyó que no existe una diferencia estadísticamente significativa dado que el valor estadístico fue de 0.18 siendo menor que el valor de tablas t (4.303).

4.18. Análisis del agente a utilizar.

Debido a que no existió una diferencia estadísticamente significativa en la producción promedio de metano en la prueba 1 donde los filtrados se ajustaron a una concentración de 20,000 mg/L y un pH de 8.5 utilizando hidróxido de sodio y óxido de calcio, se realizó la comparativa con respecto al valor comercial en el mercado de cada agente (tabla 34) donde se observa que el hidróxido de sodio tiene un valor comercial mayor al 500% con respecto al valor comercial del óxido de calcio, por lo cual se recomienda utilizar en los procesos de pretratamiento de los filtrados obtenidos en el proceso de extracción de fibra de nopal el agente químico óxido de calcio.

Tabla 34. Costo comercial de agentes químicos.

Agente Químico	Costo comercial (\$/t)
Hidróxido de sodio	340
Óxido de Calcio	65.75

4.19. Balance general

Con las mejores condiciones encontradas para la producción de metano durante las pruebas BMP y el agente químico a utilizar en los procesos de pretratamiento, se realizó el balance de materia global para el proceso de extracción de fibra de nopal considerando el aprovechamiento de los filtrados generados (Figura 36), tomando como base de cálculo de 1 kilo de nopal alimentado al proceso, el cual es troceado para posteriormente ser alimentado a la filtración a vacío; de donde se obtiene 220 g de fibra insoluble húmeda y 780 g de filtrados. Los filtrados obtenidos pasan al proceso de pretratamiento el cual consiste el ajuste de concentración a 20,000 mg DQO/L con agua alimentada, así como el ajuste de pH (8.5) con la adición de óxido de calcio, posteriormente son alimentados al proceso de digestión anaerobia en el cual se alimenta inóculo en una relación 1:1 con respecto a los filtrados pretratados, generando una producción de biogás de 15.544 g (9.53 g de metano y 6.014 g de dióxido de carbono). El biogás generado es propuesto para la generación de energía del cual se pueden obtener 530.7687 KJ, dicha energía puede ser utilizada en el proceso de secado de la fibra insoluble de nopal, en el cual se requiere una energía de 431.082 KJ para la evaporación de 180 g de agua, teniendo una energía remanente de 99.6867 KJ para ser utilizada en otro proceso (Anexo 4).

Los rendimientos obtenidos en el proceso de digestión anaerobia durante la prueba BMP se muestran en la tabla 35, en los cuales se obtienen 12.2 gramos de metano por cada kilogramo de filtrados alimentados, así como 680 KJ por cada kilogramo de filtrado para las mejores condiciones encontradas.

Tabla 35. Rendimientos con las mejores condiciones.

Rendimientos		
$12.2 \frac{g \text{ CH}_4}{kg \text{ filtrado}}$	$530.76 \frac{KJ}{kg \text{ Nopal}}$	$680.47 \frac{KJ}{kg \text{ filtrado}}$

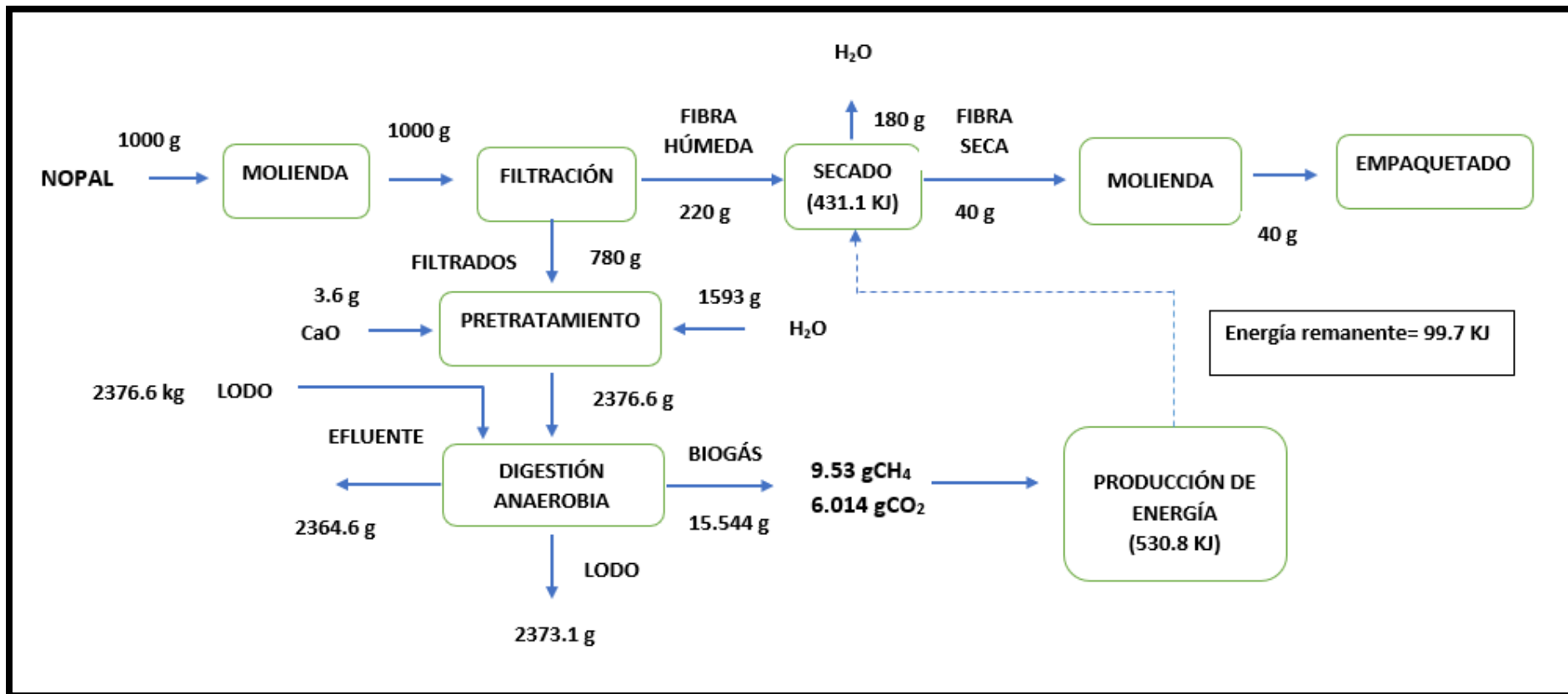


Figura 35. Proceso de extracción de nopal y aprovechamiento de los filtrados generados.

5. CONCLUSIONES

Conclusiones

Del análisis y discusión de los resultados obtenidos en la investigación realizada, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- La aplicación de los pretratamientos de concentración y químico sobre los filtrados obtenidos en el proceso de extracción de fibra de nopal, permitieron establecer las condiciones para la producción de biogás con un contenido de metano de 67.2 % por potenciación en la etapa acetogénica y metanogénica.
- Con base a los resultados obtenidos con el acondicionamiento químico con NaOH y CaO, no se observó diferencia significativa con la aplicación de uno u otro con respecto a la producción de metano.
- Las mejores condiciones de pretratamiento se obtuvieron a la concentración de 20,000 mg /L DQO y ajuste del pH de 8.5 de acuerdo con el diseño de experimentos Taguchi L₄.
- La producción de metano a las mejores condiciones fue de 1054 mL para la prueba donde se utilizó como agente químico NaOH con un rendimiento de 131.4 mL CH₄/ gDQO.
- La producción de metano a las mejores condiciones fue de 1084 mL para la prueba donde se utilizó como agente químico CaO con un rendimiento de 127.8 mL CH₄/ gDQO.

6. RECOMENDACIONES

Recomendaciones

Con base a los resultados obtenidos durante la investigación sobre la producción de biogás a partir de los filtrados generados en la extracción de la fibra insoluble de nopal, se hacen las siguientes recomendaciones para una etapa posterior del proyecto de investigación:

- Implementación experimental en un reactor anaerobio a escala piloto, partiendo de las mejores condiciones encontradas en la presente investigación.
- Análisis de ciclo de vida con los resultados del proceso experimental piloto.

7.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdelsalam E, Samer M, Attia YA, Abdel-Hadi MA, Hassan HE, Badr Y (2017) Effects of Co and Ni nanoparticles on biogas and methane production from anaerobic digestion of slurry. *Energy Convers Manag* 141:108–119.

Abdel-Shafy HI, Mansour MSM (2014) Biogas production as affected by heavy metals in the anaerobic digestion of sludge. *Egypt J Petrol* 23:409–417

Ács N, Bagi Z, Rákhely G, Minárovics J, Nagy K, Kovács KL. Bioaugmentation of biogas production by a hydrogen-producing bacterium. *Bioresour Technol*. 2015;186:286–93

Al Seadi T, Rutz D, Prassl H, Köttner M, Finsterwalder T, Volk S, Janssen R (2008) *Biogas handbook*. University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs

Alanís, E. (2017). Evaluación técnico económica de generación de biogás por digestión anaerobia a partir de residuos sólidos orgánicos generados en una industria restaurantera. (Tesis de Maestría en Ciencias de Ingeniería Ambiental). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

Amha YM, Anwar MZ, Brower A, Jacobsen CS, Stadler LB, Webster TM, Smith AL (2018) Inhibition of anaerobic digestion processes: application of molecular tools. *Biores Technol* 247:999–1014

Amin FR, Khalid H, Zhang H, Rahman S, Zhang R, Liu G, Chen C. Pretreatment methods of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion. *AMB Express*. 2017;7(1):72.

Angelidaki, I., Batstone, D., Anaerobic digestion, solid waste, *Technol. Manag* 1e2 (2010) 583e600.

Ariunbaatar, J., Panico, A., Esposito, G., Pirozzi, F., y Lens, P. N. (2014). Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste. *Applied energy*, 123, 143-156.

Brennan, L., Owende, P., Biofuels from Microalgae: Towards Meeting Advanced Fuel Standards, 2013.

Bougrier, C., Delgenes, J. P., y Carrere, H. (2006). Combination of thermal treatments and anaerobic digestion to reduce sewage sludge quantity and improve biogas yield. *Process Safety and Environmental Protection*, 84(4), 280-284.

Buyukkamaci N, Filibeli A (2004) Volatile fatty acid formation in an anaerobic hybrid reactor. *Process Biochem* 39:1491–1494

Caballero-Nolasco, Y., 2017. Codigestion anaeróbica opuntia ficus indica - estiércol de bovino: efecto de la perturbación de la carga orgánica, Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo, México.

Cai, M., Wilkins, D., Chen, J.S.K. Ng, H. Lu, Y. Jia, P.K. Lee, Metagenomic reconstruction of key anaerobic digestion pathways in municipal sludge and industrial wastewater biogas-producing systems, *Front. Microbiol.* 7 (2016) 1–12, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00778>.

Calabró, P. S., Catalán, E., Folino, A., Sánchez, A., y Komilis, D. (2018). Effect of three pretreatment techniques on the chemical composition and on the methane yields of *Opuntia ficus-indica* (prickly pear) biomass. *Waste Management y Research*, 36(1), 17-29.

Cella, M. A., Akgul, D., y Eskicioglu, C. (2016). Assessment of microbial viability in municipal sludge following ultrasound and microwave pretreatments and resulting

impacts on the efficiency of anaerobic sludge digestion. *Applied microbiology and biotechnology*, 100(6), 2855-2868.

Chen H, Liu J, Chang X, Chen D, Xue Y, Liu P, Lin H, Han S (2017) A review on the pretreatment of lignocellulose for high-value chemicals. *Fuel Process Technol* 160:196–206.

Córdova, O., y Chamy, R. (2020). *Microalgae to Biogas: Microbiological Communities Involved. Microalgae Cultivation for Biofuels Production*, 227–249. doi:10.1016/b978-0-12-817536-1.00015-1

Corrales-Garcia, J., Pena-Valdivia, C.B., Razo-Martinez, Y., Sanchez Hernandez, M.S., 2004. Acidity changes and pH-buffering capacity of nopalitos (*Opuntia* spp.). *Postharvest Biol. Technol.* 32, 169-174.

De la Rubia, M. A., Villamil, J. A., y Mohedano, A. F. (2020). *Anaerobic digestion for methane and hydrogen production. Wastewater Treatment Residues as Resources for Biorefinery Products and Biofuels*, 67–83. doi:10.1016/b978-0-12-816204-0.00004-7

Fernández-Polanco, F., y Seghezzo, L. (2015). *Diseño de reactores upflow anaerobic sludge blanket (UASB)*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.

Garcia, N. H., Mattioli, A., Gil, A., Frison, N., Battista, F., y Bolzonella, D. (2019). *Evaluation of the methane potential of different agricultural and food processing substrates for improved biogas production in rural areas. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 1–10.

García, C. (2012). Evaluación de la capacidad de remoción de materia orgánica de las aguas residuales de los rastros en un reactor UASB. (Tesis de Maestría en Ciencias de Ingeniería Ambiental). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

Ho D, Jensen P, Batstone D. Effects of temperature and hydraulic retention time on acetotrophic pathways and performance in high-rate sludge digestion. *Environ Sci Technol*. 2014;48(11):6468–76.

Imachi H, Sakai S, Ohashi A, Harada H, Hanada S, Kamagata Y, Sekiguchi Y (2008) *Pelotomaculum propionicicum* sp. nov., an anaerobic, mesophilic, obligately syntrophic, propionate-oxidizing bacterium. *Int J Syst Evol Microbiol* 57:1487–1492

Jankowska, E., Zieliński, M., Dębowski, M., y Oleśkiewicz-Popiel, P. (2019). *Anaerobic digestion of microalgae for biomethane production. Second and Third Generation of Feedstocks*, 405–436. doi:10.1016/b978-0-12-815162-4.00015-x

Jha AK, Li J, Zhang L (2011) Research advances in dry anaerobic digestion process of solid organic wastes. *Afr J Biotech* 10(65):14242–14253

Jigar, E., H. Sulaiman, A. Asfaw, A. Bairu, Study on renewable biogas energy production from cladodes of *Opuntia ficus indica*, *ISABB J. Sci. Food Agric*. 1 (2011) 44e48.

Kirk, D. M., & Gould, M. C. (2020). Bioenergy and anaerobic digestion. *Bioenergy*, 335–360. doi:10.1016/b978-0-12-815497-7.00017-8

Kumar Biswal, B., Huang, H., Dai, J., Chen, G.-H., & Wu, D. (2019). *Impact of low-thermal pretreatment on physicochemical properties of saline waste activated*

sludge, hydrolysis of organics and methane yield in anaerobic digestion. Bioresource Technology, 122423.

Lin, L., Xu, F., Ge, X., & Li, Y. (2019). *Biological treatment of organic materials for energy and nutrients production—Anaerobic digestion and composting. Advances in Bioenergy.* doi:10.1016/bs.aibe.2019.04.002

Lueangwattanapong, K., Ammam, F., Michael Mason, P., Whitehead, C., McQueen-Mason, S. J., Gomez, L. D., ... Thompson, I. P. (2019). *Anaerobic digestion of Crassulacean Acid Metabolism plants: exploring alternative feedstocks for semi-arid lands. Bioresource Technology, 122262.* doi:10.1016/j.biortech.2019.122262

Méndez-Gallegos, S. J., Gallegos-Vázquez, C., & Mondragón-Jacobo, C. (2013). Manejo de huertos comerciales de nopal tunero. *Gallegos-Vázquez, C.; Méndez-Gallegos, SJ y Mondragón-Jacobo (Eds.). Producción sustentable de la tuna. Colegio de Postgraduados y Fundación Produce San Luis Potosí, AC San Luis Potosí, México, 97-114.*

Mulat, D. G., Huerta, S. G., Kalyani, D., & Horn, S. J. (2018). Enhancing methane production from lignocellulosic biomass by combined steam-explosion pretreatment and bioaugmentation with cellulolytic bacterium *Caldicellulosiruptor bescii*. *Biotechnology for biofuels, 11*(1), 19.

Muthudineshkumar, R., & Anand, R. (2019). *Anaerobic digestion of various feedstocks for second-generation biofuel production. Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment, 157–185.* doi:10.1016/b978-0-08-102728-8.00006-1

Ogata, Y., Ishigaki, T., Nakagawa, M., & Yamada, M. (2016). Effect of increasing salinity on biogas production in waste landfills with leachate recirculation: A lab-scale model study. *Biotechnology Reports*, 10, 111–116. doi:10.1016/j.btre.2016.04.004

Palomares, C. (2018). Estudio de la dinámica de calentamiento de un reactor anaerobio utilizando energía solar. (Tesis de doctorado en Ciencias de Ingeniería Ambiental). Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, Morelia, Mexico.

Parra-Orobio, B. A., Donoso-Bravo, A., Ruiz-Sánchez, J. C., Valencia-Molina, K. J., & Torres-Lozada, P. (2018). Effect of inoculum on the anaerobic digestion of food waste accounting for the concentration of trace elements. *Waste Management*, 71, 342–349. doi:10.1016/j.wasman.2017.09.040

Paudel, S. R., Banjara, S. P., Choi, O. K., Park, K. Y., Kim, Y. M., & Lee, J. W. (2017). Pretreatment of agricultural biomass for anaerobic digestion: Current state and challenges. *Bioresource Technology*, 245, 1194-1205.

Pérez Montiel, J. I., Aldana Villasmil, G. J., & Rojano Alvarado, R. E. (2016). Evaluación hidráulica de un reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA) usando un modelo de dispersión axial. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(3), 281-291.

Quintanar-Orozco, E. T., Vázquez-Rodríguez, G. A., Beltrán-Hernández, R. I., Lucho-Constantino, C. A., Coronel-Olivares, C., Montiel, S. G., & Islas-Valdez, S. (2018). Enhancement of the biogas and biofertilizer production from *Opuntia heliabravoana* Scheinvar. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(28), 28403-28412.

Quiroz, M., Varnero, M. T., Cuevas, J. G., & Sierra, H. (2021). Cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) in areas with limited rainfall for the production of biogas and biofertilizer. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125839.

Ramírez-Arpide, F. R., Demirer, G. N., Gallegos-Vázquez, C., Hernández-Eugenio, G., Santoyo-Cortés, V. H., & Espinosa-Solares, T. (2018). Life cycle assessment of biogas production through anaerobic co-digestion of nopal cladodes and dairy cow manure. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2313–2322. doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.180

Ramírez-Arpide, F. R., Espinosa-Solares, T., Gallegos-Vázquez, C., & Santoyo-Cortés, V. H. (2019). *Bioenergy production from nopal cladodes and dairy cow manure on a farm-scale level: challenges for its economic feasibility in Mexico. Renewable Energy*. doi:10.1016/j.renene.2019.04.093

Ramírez-Arpide, F.R. G.N. Demirer, C. Gallegos-Vazquez, G. Hernandez-Eugenio, V.H. Santoyo-Cortes, T. Espinosa-Solares, Life cycle assessment of biogas production through anaerobic co-digestion of nopal cladodes and dairy cow manure, *J. Clean. Prod.* (2017), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.180>.

Ramos-Suárez, J. L., Martínez, A., & Carreras, N. (2014). Optimization of the digestion process of *Scenedesmus* sp. and *Opuntia maxima* for biogas production. *Energy conversion and management*, 88, 1263-1270..

Rincón B, Portillo MC, González JM, Borja R (2013) Microbial community dynamics in the two-stage anaerobic digestion process of two-phase olive mill residue. *Int J Environ Sci Technol* 10:635–644

Rodrigues, R. P., Rodrigues, D. P., Klepacz-Smolka, A., Martins, R. C., & Quina, M. J. (2018). *Comparative analysis of methods and models for predicting biochemical methane potential of various organic substrates. Science of The Total Environment.* doi:10.1016/j.scitotenv.2018.08.270

Sáenz, C., & Berger, H. (2006). Utilización agroindustrial del nopal (Vol. 162). Food & Agriculture Org.

Seon JY, Lee T, Lee SC, Pham HD, Woo HC, Song M (2014) Bacterial community structure in maximum volatile fatty acids production from alginate in acidogenesis. *Biores Technol* 157:22–27

Serrano, A., Siles, J. A., Chica, A. F., & Martín, M. Á. (2013). Agri-food waste valorization through anaerobic co-digestion: fish and strawberry residues. *Journal of Cleaner Production*, 54, 125–132. doi:10.1016/j.jclepro.2013.05.002

Sette, R., Jiménez, D., & De Lora, F. (1996). Tratamiento de aguas residuales. Barcelona: Reverte

Singh, L., & Kalia, V. C. (Eds.). (2017). *Waste Biomass Management-A Holistic Approach*. Cham: Springer.

Speece RE, Boonyakitsombut S, Kim M, Azbar N, Ursillo P (2006) Overview of anaero-bic treatment: thermophilic and propionate implications. *Water Environ Res* 78(5):460–473

Syaichurrozi, I., Suhirman, S., & Hidayat, T. (2018). Effect of Initial pH on Anaerobic Co-digestion of *Salvinia molesta* and Rice Straw for Biogas Production and Kinetics. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. doi:10.1016/j.bcab.2018.10.007

Taherdanak, M., & Zilouei, H. (2014). Improving biogas production from wheat plant using alkaline pretreatment. *Fuel*, 115, 714-719.

Treichel, H., & Fongaro, G. (Eds.). (2019). *Improving Biogas Production: Technological Challenges, Alternative Sources, Future Developments* (Vol. 9). Springer.

Venkiteshwaran K, Bocher B, Maki J, Zitomer D (2015) Relating anaerobic digestion microbial community and process function. *Int J Microbiol Insights* 8:37–44

Venkiteshwaran, K. B. Bocher, J. Maki, D. Zitomer, Relating anaerobic digestion microbial community and process function, *Microbiol. Insights* 8 (2016) 37, <https://doi.org/10.4137/MBI.S33593>.

Wang P, Wang H, Qiu Y, Ren L, Jiang B (2018) Microbial characteristics in anaerobic digestion process of food waste for methane production—a review. *Biores Technol* 248:29–36

Wang, D., Shen, F., Yang, G., Zhang, Y., Deng, S., Zhang, J., ... & Mei, Z. (2018). Can hydrothermal pretreatment improve anaerobic digestion for biogas from lignocellulosic biomass?. *Bioresource technology*, 249, 117-124.

Weiland, P., 2010. Biogas production: current state and perspectives. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 85, 849e860. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>.

Yang,L, M. Lu, S. Carl, J. a. Mayer, J.C. Cushman, E. Tian, H. Lin, Biomass characterization of Agave and Opuntia as potential biofuel feedstocks, *Biomass Bioenergy* 76 (2015) 43e53, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.03.004>

Yatawara MDMDWMMK (2015) Generation of biogas from degradable organic wastes, lesson 32. In: *Practical manual for GCE A/L biosystem technology teachers*, pp. 227–236

Zhang C, Su H, Baeyens J, Tan T (2014) Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renew Sustain Energy Rev* 38:383–392

8. ANEXO

Anexo 1. Cálculo de los balances de materia.

Para el balance de materia con respecto a la DQO inicial alimentada en la prueba BMP se realizó de la siguiente manera:

$$DQO_{filtrados} = 60,850 \text{ mg/L}$$

$$DQO_{inoculo} = 130,200 \text{ mg/L}$$

Realizando el balance de materia donde se alimentaron 200 mL de filtrados e inóculo:

$$DQO_{filtrados}^{ajustados} (0.2L) + DQO_{inoculo} (0.2L) = (0.4 L) DQO_{inicial}^{mezcla}$$

$$\left(20,000 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) (0.2L) + \left(130,200 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) (0.2L) = (0.4 L) DQO_{inicial}^{mezcla}$$

$$DQO_{inicial}^{mezcla} = \frac{\left(20,000 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) (0.2L) + \left(130,200 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) (0.2L)}{(0.4 L)}$$

$$DQO_{inicial}^{mezcla} = 75,100 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Realizando el mismo procedimiento para cuando la concentración de los filtrados fue ajustada a 10,000 mg/L.

Anexo 2. Cálculos de los rendimientos de producción de metano.

Para el cálculo de los rendimientos obtenidos para la producción de metano a partir de la DQO consumida durante la prueba BMP se siguieron los siguientes pasos para los cálculos:

1. DQO consumida durante la prueba BMP

$$\begin{aligned}DQO_{consumida}^{Prueba\ 1\ (CaO)} &= DQO_{inicial}^{mezcla} - DQO_{final}^{mezcla} \\DQO_{consumida}^{Prueba\ 1\ (CaO)} &= 75,100 \frac{mg}{L} - 45,100 \frac{mg}{L} \\DQO_{consumida}^{Prueba\ 1\ (CaO)} &= 30,000 \frac{mg}{L}\end{aligned}$$

Donde el volumen total del sistema fue de 0.4 L

$$\begin{aligned}DQO_{consumida}^{Prueba\ 1\ (CaO)} &= 30,000 \frac{mg}{L} (0.4\ L) \\DQO_{consumida}^{Prueba\ 1\ (CaO)} &= 12,000\ mg \\DQO_{consumida}^{Prueba\ 1\ (CaO)} &= 12\ g\end{aligned}$$

2. DQO consumida durante la prueba BMP del blanco de inóculo

$$\begin{aligned}DQO_{consumido}^{blanco} &= DQO_{inicial}^{mezcla} - DQO_{final}^{mezcla} \\DQO_{consumido}^{blanco} &= 57,850 \frac{mg}{L} - 40,250 \frac{mg}{L} \\DQO_{consumido}^{blanco} &= 17,600 \frac{mg}{L}\end{aligned}$$

Donde el volumen total del sistema fue de 0.2 L

$$\begin{aligned}DQO_{consumido}^{blanco} &= 17,600 \frac{mg}{L} (0.2L) \\DQO_{consumido}^{blanco} &= 3,520\ mg \\DQO_{consumido}^{blanco} &= 3.52\ g\end{aligned}$$

3. Realizando la resta de la DQO consumida por el blanco de lodo sobre la mezcla.

$$DQO_{consumida\ ajustada}^{Prueba\ 1\ (CaO)} = DQO_{consumida}^{Prueba\ 1\ (CaO)} - DQO_{consumido}^{blanco}$$

$$DQO_{consumida\ ajustada}^{Prueba\ 1\ (CaO)} = 12\ g - 3.52\ g$$

$$DQO_{consumida\ ajustada}^{Prueba\ 1\ (CaO)} = 8.48\ g$$

4. Metano producido por la prueba número 1 utilizando óxido de calcio y el blanco de lodo.

$$Metano_{prueba\ 1} = Biogas_{producido}(X_{metano}^{prueba\ 1})$$

$$Metano_{prueba\ 1} = (4849.5\ mL)(0.646)$$

$$Metano_{prueba\ 1} = 3132.8\ mL$$

$$Metano_{inóculo} = Biogas_{producido}(X_{metano}^{prueba\ 1})$$

$$Metano_{inóculo} = (2712.5\ mL)(0.755861)$$

$$Metano_{inóculo} = 2050.273\ mL$$

$$Metano_{prueba\ 1}^{ajustado} = Metano_{prueba\ 1} - Metano_{inóculo}$$

$$Metano_{prueba\ 1}^{ajustado} = 3132.8\ mL - 2050.273\ mL$$

$$Metano_{prueba\ 1}^{ajustado} = 1083.7\ mL$$

5. Cálculo de rendimientos

$$rendimiento = \frac{Metano_{prueba\ 1}^{ajustado}}{DQO_{consumida\ ajustada}^{Prueba\ 1\ (CaO)}}$$

$$rendimiento = \frac{1083.7\ mL}{8.48\ g}$$

$$rendimiento = 127.8 \frac{mL}{g\ DQO\ consumidos}$$

Anexo 3. Caracterización de biogás.

La caracterización del biogás producido se realizó 4 veces a lo largo de los 62 días de duración de la prueba BMP, del cual se calculó el promedio para cada prueba tomando en cuenta los valores mostrados en las tablas 36, 37 y 38 para el hidróxido de sodio, óxido de calcio y blancos.

Tabla 36. Caracterización del biogás producido (NaOH).

	NaOH															
Prueba	1		1R		2		2R		3		3R		4		4R	
Área	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂
1	28.2	71.8	34.0	66.0	33.3	66.7	33.1	66.9	33.3	66.7	34.9	65.1	35.0	65.0	29.9	70.1
2	66.4	33.6	66.4	33.6	65.1	34.9	64.7	35.3	65.0	35.0	68.1	31.9	68.3	31.7	70.4	29.6
3	71.5	28.5	71.5	28.5	68.7	31.3	68.9	31.1	68.6	31.4	72.5	27.5	74.2	25.8	75.5	24.5
4	84.4	15.6	84.4	15.6	84.9	15.1	84.3	15.7	81.4	18.6	84.2	15.8	79.7	20.3	84.9	15.1
PROMEDIO	62.6	37.4	64.1	35.9	63.0	37.0	62.8	37.2	62.1	37.9	64.9	35.1	64.3	35.7	65.2	34.8

Tabla 37. Caracterización del biogás producido (CaO).

	CaO															
Prueba	1		1R		2		2R		3		3R		4		4R	
Área	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂
1	37.0	63.0	37.7	62.3	22.7	77.3	40.3	55.5	42.8	57.2	40.7	59.3	22.4	77.6	18.6	81.4
2	67.2	32.8	64.1	35.9	65.7	34.3	68.5	31.5	72.9	27.1	69.3	30.7	65.1	34.9	64.2	35.8
3	73.5	26.5	74.6	25.4	69.5	30.5	73.4	26.6	72.9	27.1	72.7	27.3	71.0	29.0	81.4	18.6
4	83.1	16.9	79.7	20.3	84.8	15.2	82.9	17.1	83.1	16.9	82.9	17.1	82.3	17.7	81.0	19.0
PROMEDIO	65.2	34.8	64.0	36.0	60.7	39.3	66.3	32.7	67.9	32.1	66.4	33.6	60.2	39.8	61.3	38.7

Tabla 38. Caracterización del biogás producido (Blancos).

	Blancos							
Prueba	BL		BLR		BS		BSR	
Área	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂
1	70.9	29.1	72.6	27.4	2.7	97.3	2.7	97.3
2	78.0	22.0	80.9	19.1	46.9	53.1	46.9	53.1
3	88.2	11.8	89.6	10.4	74.1	25.9	77.5	22.5
PROMEDIO	74.4	25.6	76.8	23.2	41.2	58.8	42.4	57.6

Anexo 4. Balance de materia de acuerdo con las condiciones encontradas en la prueba BMP.

El balance de materia utilizando las mejores condiciones encontradas en la prueba BMP para la producción de metano se realizó calculando un factor, el cual se multiplico por todos los resultados obtenidos cuando se alimentan 780 gramos de filtrados al proceso de pretratamiento y digestión anaerobia. El cual se calculo de la siguiente manera:

Ajuste de concentración a 20,000 mg DQO/L

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

$$\left(60850 \frac{\text{mgDQO}}{\text{L}}\right) V_1 = \left(20000 \frac{\text{mgDQO}}{\text{L}}\right) (500 \text{ mL})$$

$$V_1 = 164.34 \text{ mL}$$

$$V_{H_2O} = 500 \text{ mL} - 164.34 \text{ mL} = 335.66 \text{ mL}$$

Ajustando a una alimentación de 780 mL o 780 g de filtrados obtenemos el siguiente factor:

$$f = \frac{780 \text{ mL}}{164.34 \text{ mL}} = 4.7463$$

Por lo tanto, se debe ajustar una alimentación de agua para el pretratamiento de concentración de:

$$F_{H_2O}^{\text{Pretratamiento}} = (4.7463)(335.66 \text{ g}) = 1593 \text{ g}$$

Así mismo para los diferentes ajustes y valores obtenidos durante la prueba BM como lo es la producción de metano, el cual se realizó de la siguiente manera:

$$\text{Metano}_{\text{prueba 1}} = 3132.8 \text{ mL}$$

$$n = \frac{P V}{R T} = \frac{(1 \text{ atm})(3.1328 \text{ L})}{\left(0.08206 \frac{\text{L atm}}{\text{mol K}}\right) (304.15 \text{ K})} = 0.1255 \text{ mol CH}_4$$

$$n_{ajustados} = 0.1255 \text{ mol } CH_4 (4.7463) = 0.596 \text{ mol } CH_4$$

$$m_{CH_4} = 0.596 \text{ mol } CH_4 \left(16 \frac{g}{mol} \right) = 9.53 \text{ g } CH_4$$

El cual, si se somete a un proceso de combustión, se genera una energía de:

$$Q = n \Delta H_c = (0.596 \text{ mol}) \left(891 \frac{KJ}{mol} \right)$$

$$Q = 531.036 \text{ KJ}$$

Con el cual se logra una evaporación de agua en el proceso de secado de la fibra de:

$$Q = m \lambda_{40^\circ C}$$

$$531.036 \text{ KJ} = m \left(2394.9 \frac{KJ}{kg} \right)$$

$$m = 0.2217 \text{ kg}$$

De lo cual se requiere solamente evaporar 0.18 kg, por lo tanto, se tiene un exceso de energía del:

$$Q_{energia \text{ restante}} = 531.036 \text{ KJ} - 431.082 \text{ KJ} = 99.7 \text{ KJ}$$

