

Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de ingeniería

Campus Amazcala

Ingeniería agroindustrial

“Efecto del suero de leche y la magnetita en la producción de biogás en biodigestores con estiércol de vaca”

Tesis para obtener el grado de ingeniero agroindustrial

Presenta: Pablo Ramírez Chávez

Dirigida por:

Dr. Enrique Rico García

Presidente

Dr. Luis Miguel Contreras Medina

Vocal

Dr. Humberto Aguirre Becerra

Secretario

Dr. Adrián Esteban Ortega Torres

secretario

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

DEDICATORIAS

A mi familia por nunca dejar de apoyarme y siempre darme lo mejor y mi novia por confiar en mí y estar conmigo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma de Querétaro campus Amazcala por permitirme terminar de buena manera la carrera en ingeniería agroindustrial de manera satisfactoria, a mi familia por el apoyo brindado a lo largo de mi vida estudiantil y por nunca dejar de apoyarme, a mis maestros y compañeros de la universidad y a mi novia por estar para mí en todo momento.

INDICE

Dedicatorias.....	1
Agradecimientos.....	2
Resumen y abstract.....	4
Cap1.Introducción.....	5
Cap2. Revisión bibliográfica.....	6
Fundamentos teóricos.....	6
Antecedentes.....	12
Cap3. Hipótesis y objetivos.....	21
Cap4. Materiales y métodos.....	22
Cap. 5 Resultados y discusión.....	31
Ca6. Conclusiones.....	39
Referencias.....	40

ABSTRACT

Greenhouse gases from intensive livestock farming are a global problem, with cow manure being one of the main pollutants. Therefore, the use of biodigesters to generate biogas from this waste allows us to generate clean energy and reduce pollution. This work proposes the use of this technology, using cow manure as a base and magnetite and whey as co-substrates in different concentrations. According to the proposed methodology, there is a significant difference in biogas production, making it a more cost-effective technology.

RESUMEN EN ESPAÑOL

Los gases de efecto invernadero provenientes de la ganadería intensa son un problema a nivel global siendo el estiércol de vaca uno de los principales contaminantes por lo cual el uso de biodigestores para generar biogás proveniente de estos desechos nos permite generar energía limpia y disminuir la contaminación, dicho trabajo propone el uso de dicha tecnología utilizando como base el estiércol de vaca y como cosustratos la magnetita y el suero de leche en diferentes concentraciones ya que de acuerdo a la metodología planteada existe una diferencia significativa en la producción de biogás siendo que sea una tecnología más rentable

1. INTRODUCCIÓN

El impacto ambiental de la ganadería en el cambio climático y la contaminación del aire dichas actividades emiten grandes cantidades de gases de efecto invernadero, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O). “Las excretas animales emiten CH_4 , N_2O , amoníaco (NH_3) y CO_2 , en función de cómo salen de las instalaciones (sólida o líquida) y de su manejo en la colección, almacenamiento y aplicación a la agricultura” (Pérez R, 2008).

Dicha tecnología ha sido muy utilizada ya que tienen menores gastos iniciales y continuos, agregando de su alta capacidad para utilizar residuos orgánicos, los cuales reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, el uso de biogás además reduce el uso de vertederos y las emisiones de metano al convertir todos estos desechos en energía, lo cual representa una ventaja en contra del panorama de aumento a nivel mundial de producción de residuos sólidos con 2 gigatoneladas en 2020 y se prevé que para 2050 dichos residuos aumenten a 3.5 gigatoneladas (Briñez F, 2025).

Por lo que una ocupar estos residuos como sustrato principal adicionando suero de leche y magnetita para la digestión anaerobia con una tecnología que es ampliamente conocida y al alcance (biodigestores), podría ayudar a combatir los efectos negativos al medio ambiente que se generan teniendo estos residuos sin ningún tratamiento además de que se obtiene una forma de combustible que es el biogás además de lodos que pueden ser aprovechados en la agricultura.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Los biodigestores funcionan bajo el principio de la digestión anaerobia es un proceso de transformación de materia orgánica mediante la acción de bacterias mesófilas y termófilas que viven en condiciones anaeróbicas para la obtención de biogás y otros subproductos” (David et al., 2018), dicha materia orgánica puede tener diferentes orígenes ya que existe una amplia variedad de sustratos que se han usado para la producción de biogás como puede ser diferentes tipos de estiércol de animales: bovino, porcino, avícola y hasta humano, residuos forestales y vegetales.

Este proceso se puede dividir en cuatro etapas (hidrolisis, acidogénesis acetogénesis y metanogénesis) y en cada una intervienen diferentes tipos de microorganismos, donde la naturaleza y la composición química del sustrato determinan la composición cualitativa de dicha población de microorganismos, por ejemplo, en la fase hidrolisis-acidogénesis suelen ser microorganismos facultativos (crecen con o sin oxígeno) y para la metanogénesis son estrictos (solo crecen en ausencia de oxígeno)(Antonio & Aguilera, 2017).

- Hidrolisis:

En esta etapa los componentes orgánicos (carbohidratos, proteínas, grasas) contenidos en el sustrato son degradados a moléculas más simples en el caso de las carbohidratos pasan a ser monosacáridos y las proteínas en ácidos grasos y aminoácidos; esta etapa es muy importante ya que la lignocelulosa, y sus derivados son resistentes a la degradación anaerobia por lo que el procesos puede llegar a ser lento, además se debe tomar en

cuenta dichas reacciones son afectadas por pH alejados del neutro, la alta concentración de amonio y la presencia inhibidores como subproductos de la hidrólisis (Núñez-Pintado, 2017.).

- Acidogénesis (fermentación):

En este proceso los monosacáridos y aminoácidos se vuelven a degradar para dar paso a compuestos más simples, teniendo como productos ácidos grasos volátiles (VFA) como: ácido acético, butírico, valérico y propiónico), alcoholes, dióxido de carbono e hidrogeno, siendo la etapa más rápida de la digestión. (Núñez-Pintado, 2017.)

Los puntos críticos de esta fase es el nivel de pH ya que siendo mayor a 5 la producción de VFA aumenta y con un pH menor a 5 es mayor la formación de etanol, tomando en cuenta que el ácido acético será el que se convertirá en metano por lo que procurar su formación es clave para la producción de biogás.

- Acetogénesis:

En esta fase los productos que no pueden ser convertidos directamente en metano por las bacterias metanogénicas VFA y alcoholes se oxidan en acetato e hidrogeno (K. F. Adekunle & Okolie, 2015). Es importante que los organismos que participan en esta fase colaboren y para lograrlo depende de la presión parcial de hidrogeno ya que en la oxidación anaeróbica los protones se utilizan como aceptores finales de electrones que conducen a la producción de H₂ lo cual solo puede ocurrir si la presión parcial de hidrogeno es baja (K. F. Adekunle & Okolie, 2015).

- Metanogénesis:

Etapa final de la digestión anaerobia donde los organismos metanogénicos consumen los productos de las reacciones anteriores para producir metano y dióxido de carbono, regularmente dos terceras partes del metano total obtenido proviene de la metanogénesis acetoclástica y la metanogénesis

hidrogenotrófica representa el otro tercer parte restante (Meegoda et al., 2018).

Microorganismos involucrados en el proceso de la digestión anaerobia

De manera general podemos tener al menos tres grupos metabólicos esenciales en el proceso de la digestión anaerobia las bacterias homoacetógenicas (BHA) y las arqueas metanógenas.

- Bacterias homoacetógenicas

Este grupo genera acetato como producto principal y dependiendo de la especie pueden utilizar diferentes compuestos como el H_2 , azúcares, ácidos orgánicos, aminoácidos alcoholes y algunas bases nitrogenadas para producirlo, este proceso lo realizan mediante “la reducción del CO_2 en acetato a expensas de H_2 en los homoacetógenos autótrofos por la vía del acetylCoA mediante el monóxido carbono deshidrogenasa” (Ferrer Y, Pérez H, 2010). En este grupo se encuentran varios géneros de acetobacterias y clostridius.

- Bacterias reductoras de sulfatos (BSR)

“La utilización de sulfato (SO_4) como aceptor de electrones para generar energía metabólica implica una reducción de este ion hasta sulfuro de hidrógeno (H_2S)” (Ferrer Y, 2010) dicha reducción es realizada por la enzima sulfito reductasa utilizando sulfato previamente activado por su unión con ATP. Los miembros que mejor realizan este proceso pertenecen a los desulfobrionales y desulfobacters, dichas bacterias pueden oxidar completamente el acetato hasta CO_2 de manera que pueden crecer en medios anóxicos.

- Arqueas metanógenas

Este grupo es el único que puede metabolizar compuestos de carbono de bajo peso molecular e hidrogeno produciendo metano y dependiendo del sustrato que utilizan para su elaboración los podemos agrupar en tres

grupos: “Metanógenos hidrogenotróficos: Crecen con hidrógeno molecular (H_2) como donador de electrones y CO_2 como aceptor de electrones. Algunos hidrogenotróficos pueden usar formiato, el cual es la fuente de CO_2 y H_2 . Metanógenos acetoclásticos: Rompen el acetato en grupos metilo y carbonilo, oxidando el grupo carbonilo hasta CO_2 y proporcionando el potencial de reducción para reducir el grupo metilo a metano.

Metanógenos metilotróficos: Crecen en compuestos metilados como metanol, metilaminas y metilsulfuro, los cuales actúan como donantes o aceptores de electrones o son reducidos con H_2 ”(Ferrer Y, 2010).

Diferentes tipos de sustratos

Para el uso de los biodigestores se han usado diferentes tipos de sustratos ya que, dependiendo de estos, se obtienen diferentes resultados, un estudio realizado por Otieno et al 2023 propone el uso de piña para la generación de biogás utilizando toda la fruta completa, incluyendo la cascara, la pulpa, el corazón y la corona, debido a que estos desechos son ricos en celulosas y carbohidratos que sirven como fuente de carbono para digestión anaerobia para producir metano.

No solo se puede utilizar como sustrato los desechos provenientes de la ganadería como es el caso del estiércol si no que se han utilizado residuos de origen vegetal (lignocelulosas) aunque son ineficaces debido a su estructura que es difícil de degradar por lo que regularmente son utilizados como cosustratos ya que los diferentes tipos de estiércol contienen microbios funcionales que pueden complementar la actividad biológica, pero son insuficientes para la producción de biogás (Otieno et al., 2023) obteniendo como resultado una mayor producción de biogás en el rango mesofílico alrededor de los $30^{\circ}C$ iniciando con la producción de biogás a los 12 días aproximadamente con una proporción de residuos de 1:1 (estiercol:piña) donde además se produjo más gas en comparación con proporciones de 1:2 y 1:3 donde la concentración Como otro cosustrato se

pueden utilizar inclusive plantas como es el caso de *jatropha* en un estudio realizado por Adekunle et al., 2019 en donde además se mezclaba con estiércol de vaca y limaduras de hierro, obteniendo como resultado una producción promedio de 59 ml/kg de producción de biogás por las primeras 4 semanas pero a la quinta semana encontraron que utilizando el catalizador la producción de biogás se elevó a 6 y 7 veces aproximadamente, en dicho trabajo se utilizaron diferentes tratamientos en donde se midió la producción de biogás con estiércol solo (T1), estiércol con el fruto de la planta (T2), estiércol el exocarpo de la planta (T3) y con la planta y el catalizador (T4) donde a las 5 semanas sus resultados fueron 77, 154, 145 y 586 ml, respectivamente y cómo podemos observar el tratamiento con mejor rendimiento fue el 4 en donde se usa la planta, el estiércol y la limadura contribuyó a la producción de biogás.

A lo largo de la historia con la necesidad de crear nuevas energías de menor costo, fácil acceso y comprometidas con la reducción del impacto ambiental, en los años 1808 comenzó la investigación de la descomposición del gas metano a partir de desechos que en un principio fueron de origen animal (estiércol) y tomando como referencia los aportes de Pasteur, da origen a la idea de la fermentación de los desechos (Báez G&Benítez D, 2015).

La industria de los biodigestores comienza de manera formal en 1890 en la India en donde se construye el primero a escala real, posteriormente al termino de las guerras mundiales se difunde por toda Europa las fábricas productoras de biogás las cuales impulsaban tractores y automóviles de la época, ya en los años 1930 el gobierno de China impulsa la construcción de biodigestores en zonas rurales, actualmente países como China, India y Sudáfrica cuentan con más de 30 millones de biodigestores funcionando (Ávila C, 2016)

Hoy en día con el avance de la tecnología aplicada al área de biodigestores se concluyó que “La presencia simultánea de varios tipos de residuos en un

proceso de cogestión anaerobia puede mejorar significativamente el proceso produciendo rendimientos de metano superiores a los obtenidos a partir de cada residuo de manera individual” (Pagés Díaz&Reyes, 2017) ya que muchas de la enzimas necesarias para cada ruta metabólica que se sigue en las diferentes fases de la digestión de cada sustrato son dependientes de algunos nutrientes que no siempre están presentes en el sustrato de manera natural, por lo que agregar una mezcla de sustratos diferentes puede facilitar a los diferentes microorganismos estos nutrientes, además esta heterogeneidad en los sustratos puede conllevar al desarrollo y crecimiento de una variedad de microorganismos que estimulan el proceso de digestión(Pagés Díaz & Reyes, 2017) por lo que existen diferentes investigaciones en donde ya no solo se usa un sustrato único si no que se busca la idea de usar cosustratos, los cuales pueden ser de diferente origen y no solo como tal residuos, por lo que ya no solo se usan los clásicos residuos como los diferentes tipos de estiércol, desechos agrícolas o urbanos si no se empiezan a usar otro tipo de materiales como óxidos, metales u otras partículas.

La tecnología de biodigestores en la parte de venta va más enfocada a que sean un opción en lugar de una fosa séptica para lugares en donde no hay drenaje o es de difícil acceso y se puedan manejar las heces del lugar, existen diferentes marcas como la de Rotoplas en donde tienen diferentes tamaños y capacidades las cuales van desde los 600 hasta los 7000 L, con una altura desde los 1.6 m hasta los 2.6 m, además de que cuentan también con un aproximado de las personas que lo van a utilizar teniendo como promedio 130 L/ usuario/ día.

Rotoplas maneja un biodigestor auto limpiable el cual sirve para el tratamiento de las aguas negras y grises, el tratamiento de aguas residuales con este producto se da en 3 etapas donde en la primera ingresa el agua residual hasta el fondo donde se separa los lodos del agua, en la segunda las bacterias comienzan la descomposición y el agua pasa a través

de una cama de lodos, finalmente en la tercera el agua pasa un filtro anaerobio para retener una parte de la contaminación y el agua se direcciona hacia una zanja de infiltración o pozo de absorción y los lodos son decantados al fondo del biodigestor.

Debido al desgaste que ha tenido nuestro planeta debido al uso excesivo de combustibles fósiles ya que es la principal fuente de energía, se ha optado por desarrollar diferentes tecnologías en las que además de generar energía se puedan aprovechar los desechos de alguna industria, tomando en cuenta esto se desarrollaron los biodigestores. Como un área de oportunidad están los desechos que se generan de la ganadería ya que nivel mundial es considerada una de las principales fuentes de emisión de gases de efecto invernadero y en el caso de México, la ganadería extensiva, sigue siendo el sistema de producción más importante ya que juega un papel crucial en la producción de alimentos de origen animal y en la configuración rural de todo el país, se estima que se cerca de 700 millones de toneladas de dióxido de carbono fueron emitidas en el 2018 por esta industria donde 10.05% provenientes de la ganadería y 71% corresponden a los bovinos (Deschamps Leticia et al., 2020)

2.3 ANTECEDENTES

Un biodigestor es un contenedor cerrado herméticamente e impermeable, de diferentes materiales como concreto, polietileno, hormigón, metal entre otros, en donde se depositan desechos orgánicos ya sean vegetales u animales para que se degraden por medio de un proceso de descomposición conocido como digestión anaerobia obteniendo como resultado biogás y abono natural, convirtiendo estos desechos en energía limpia, la cual se puede usar para emitir energía térmica o eléctrica (Ávila C, 2016).

Tipos de biodigestores

- Plantas de globo

Cuentan con un biodigestor de bolsa en la parte de arriba en donde se almacena el gas, la entrada y salida se encuentran a la misma altura que la bolsa, son de bajo costo, fácil transportación, limpieza y mantenimiento, pero por otro lado tiene un tiempo de vida corto y se dañan fácil.

- Plantas de domo fijo

Tienen un domo fijo en la parte superior, el cual no se puede mover ya que cuando empieza la producción de gas la mezcla se desplaza hacia el tanque de compresión, costos de producción bajos, larga vida útil y ahorra espacio debido a su construcción subterránea pero no son del todo permeables ya que una fractura en la parte superior puede causar fugas de gas (Corona Iván, 2007).

- Plantas de tambor flotante (tipo hindú)

Biodigestor subterráneo con un recipiente móvil para el gas el cual flota ya sea directamente sobre el sustrato, operación simple y fácil, presión de gas constante, pero sus costos son más elevados debido a sus materiales además del mantenimiento que se le debe de dar (Corona Iván, 2007).

- Bach:

son biodigestores a escala ya que normalmente son utilizados para pruebas en laboratorios ya que su principal objetivo es saber si los sustratos producen o no biogás y en cuanto tiempo, su tamaño y materiales pueden variar, pero regularmente son pequeños para que sea más fácil su operación, normalmente en este tipo de biodigestores se suele ocupar una carga con el sustrato a probar y se agrega un inoculo (organismos para que arranque la reacción) los cuales pueden provenir de otro biodigestor en funcionamiento (FAO, 2019)

Este tipo de biodigestores son alimentados por ciclos y el proceso de degradación del sustrato consta de 4 etapas: alimentación, reacción, sedimentación y descarga; presentan las siguientes ventajas:

- Flexibilidad de operación ya que la biomasa se adapta a los sustratos.
- Mejor calidad del efluente, debido a que se puede vigilar de mejor manera la calidad y estándares requeridos.
- Existe una dinámica de abundancia/ escasez del sustrato, simulando de una mejor manera el estado natural de los microorganismos.
- (FAO, 2019)

Existen diferentes tipos de biodigestores y se diferencian principalmente por: modo de operación, llenado y vaciado, volumen, número de tanques de proceso, orientación o los sistemas de movilización de biomasa, tipo de alimentación continuo o parcial pero de manera general se pueden distinguir de dos tipos: a pequeña escala que son los que se instalan en comunidades agrícolas o viviendas los cuales normalmente son alimentados de manera continua o semicontinua y los de escala industrial a los cuales ya se les puede llamar plantas de biogás, alimentados de manera continua y cuentan con bombas o agitadores tipo Bach (Saavedra et al., 2017).

Partes de un biodigestor

Para determinar el tipo de biodigestor se debe tomar en cuenta el volumen de entrada ya que dependiendo del tipo tienen diferentes capacidades, pero de manera general existen 5 elementos básicos que componen cualquier tipo de biodigestor:

- Pila de carga

Es un contenedor en donde se preparan las mezclas y en algunos casos homogenizar la materia orgánica controlando los sólidos totales y el pH y en el caso en el que no se cuente se debe de optar con un tanque de metal o plástico para llevar a cabo esta función

- Digestor o cámara de digestión

En esta parte se lleva a cabo la digestión anaerobia y es el contener principal del equipo.

- Pila de descarga

su función es retirar los residuos provenientes del tanque que fueron digeridos (abono orgánico o biol), debido a que es la salida de todo el material, debe de ir a un menor nivel que la pila de carga para que los residuos logren salir de manera hidráulica por gravedad.

- Tapa o cubierta plástica

debido a que las reacciones ocurren con la usencia de oxígeno es importante tener en cuenta que se debe de evitar la entrada de aire al sistema por lo que se debe de contar con una tapa.

- Tubería, válvula de alivio y llave de paso

Se debe tener una tubería para que el gas pueda fluir y dependiendo si se será utilizado inmediatamente llegue hasta donde se vaya a utilizar o si se va almacenar que llegue a los contenedores correspondientes, la válvula de alivio es una parte que funciona para el drenado del biogás y la llave de paso permite que se controle el paso del biogás (Ávila C, 2016)

Biogás

Al usar los biodigestores se obtiene el biogás, el cual es una mezcla de diferentes gases: metano (50%-70%), CO₂ (30%-45%), hidrogeno (1%-3%), oxigeno (0.5%-1%) tomando en cuenta su composición se puede utilizar como cualquier otro combustible ya que tiene un poder calórico que varía entre 16500 KJ/KG y 21000 KJ/KG, también se obtiene un “lodo” rico en minerales que no pudieron ser degradados (Pagés Díaz&Reyes, 2017) este proceso es una alternativa para manejar el estiércol proveniente de las diferentes actividades pecuarias ya que presenta algunos beneficios: la producción de biogás que puede ser utilizado como fuente de energía renovable, reducción de la contaminación ambiental por sustancias

contenidas en el estiércol y la obtención de fertilizantes (lodos) (Castro-Molano et al., 2019).

Puntos críticos de biodigestión anaerobia

Como se explicó la biodigestión anaerobia es un proceso complejo y se deben de tener en cuenta varios parámetros los cuales se pueden dividir en ambientales y operacionales.

Ambientales:

- pH: dependiendo de la fase en la que se encuentre el proceso de digestión anaerobia los diferentes microorganismos involucrados necesitan un pH diferente, en el caso de los organismos hidrolíticos se necesita un rango de 7.2-7.4, en el caso de los microorganismos acetogénicos de 7-7.2 y para los microorganismos metanogénicos de 6.5-7.5, para controlar este parámetro en el caso de que se utilicen mezclas de sustratos se puede optar por agregar cal para llegar al pH requerido
- Potencial REDOX: (actividad de electrones presentes en una reacción química) se debe evitar un valor alto ya que eso el desarrollo de los microorganismos metanogénicos.
- Nutrientes: se necesita una buena relación de elementos para permitir el desarrollo de todos los microorganismos, principalmente N, C y P.
- “La relación C/N debe de estar comprendida entre 15/1 y 45/1, siendo el valor recomendable 30/1, ya que valores inferiores disminuyen la velocidad de reacción. Mientras que la relación C/P debe de ser igual 150/1, valores inferiores no van a crear problemas de inhibición” (González, 2017).

Operacionales

- Temperatura: factor decisivo que marca la velocidad de las reacciones en todo el proceso de la digestión anaerobia, el rango de

temperatura puede ir del rango psicrófilico (15–18°C), mesófilico (28–33°C) y termófilico (<60°C) pero el rango óptimo y el más empleado en este proceso es el mesófilico ya que la mayoría de las bacterias trabajan bien a ese nivel.

- Agitación: es importante ya que se homogeniza el sustrato de alimentación con el sustrato de digestión, se alcanza una distribución uniforme para mantener una temperatura correcta, se favorece la transferencia de gases.
- Tamaño de partícula: con un tamaño de partícula menor se consigue un aumento en la superficie disponible por lo que se consigue una mejora del proceso biológico y del rendimiento de producción de biogás.
- Tiempo de retención: se debe tomar en cuenta que existe un tiempo de retención mínimo para el inicio de la producción de biogás el cual puede variar dependiendo el sustrato, “una producción de gas por unidad de volumen de reactor con un máximo para un tiempo de retención correspondiente a una eliminación de sustrato entre el 40 y el 60%.” (González, 2017).
- Velocidad de carga orgánica: cantidad de materia orgánica por unidad de volumen y tiempo “Un valor bajo de velocidad de carga orgánica implica una baja concentración en el influente y/o elevado tiempo de retención, mientras que su incremento conlleva una reducción en la producción de gas por unidad de materia orgánica introducida. Por este motivo se tendrá que buscar un valor óptimo desde el punto de vista técnico y económico para cada instalación y residuo a tratar” (González, 2017).

Uso de cosustratos y catalizadores

Debido a que existen diferentes residuos que pueden ser aprovechados como sustrato en la digestión anaerobia para la generación de biogás y no solo se usa estiércol como sustrato si no que la presencia simultánea

de varios tipos de residuos en un proceso de cogestión anaerobia puede mejorar significativamente el proceso produciendo rendimientos de metano superiores a los obtenidos a partir de cada residuo de manera individual (Pagés Díaz&Reyes, 2017) ya que muchas de la enzimas necesarias para cada ruta metabólica que se sigue en las diferentes fases de la digestión de cada sustrato son dependientes de algunos nutrientes que no siempre están presentes en el sustrato de manera natural por lo que agregar una mezcla de sustratos diferentes puede facilitar a los diferentes microorganismos estos nutrientes, además esta heterogeneidad en los sustratos puede conllevar al desarrollo y crecimiento de una variedad de microorganismos que estimulan el proceso de digestión (Pagés Díaz&Reyes, 2017).

Por lo que en dicho trabajo se propone no solo usar el estiércol de vaca por sus características reportadas en el manual para la producción de biogás (FAO) describe que tiene el siguiente contenido de nutrientes: sólidos totales 13.4 a 56.2%; cenizas 19.66%; Nitrógeno total 1.3%; Carbono 30%; la relación Carbono/Nitrógeno 25:1; concentración de proteínas 9.05% y los lípidos 3.23%, en la parte de solidos totales se refiere a solidos volátiles (proteínas, carbohidratos y lípidos) y minerales, este contenido de nutrientes es justamente el necesario para los microorganismos involucrados en la digestión anaerobia lo cual hace que este sustrato sea el más utilizado en la producción de biogás por este método (Varnero M, 2011) y su disponibilidad ya que un bovino adulto puede llegar a defecar de 10-15 veces por día, generando de 20-45 kg de estiércol, que regularmente se queda en el lugar donde fue expulsado siendo una fuente latente de contaminación ya que un solo kg de estiércol puede llegar a producir entre 37 a 170 ml de gas metano en periodo de 10 a 18 días.

EL suero de leche lo podemos definir como un líquido que se forma como un subproducto de durante la producción de queso o derivados

lácteos, el cual es rico en materia orgánica además de ser altamente biodegradable teniendo un alto potencial, para ser utilizado para la producción de biogás (Parlina L, et al 2026).

En Altamira et al., 2017 también se propone el suero de leche el cual es un subproducto proveniente de la leche que se obtiene después de la coagulación de la leche para la obtención del queso y esta conserva todos los compuestos que no se integran en la coagulación de la caseína, su composición varía dependiendo del tipo de leche, pero de manera general es un 93,1 % agua, 4,9 % lactosa, 0,9 % proteína cruda, 0,6 % minerales, 0,3 % grasa, 0,2 % ácido láctico y vitaminas hidrosolubles (Schachenmayr & Otto, 2019) aunque existen diferentes estudios sobre su uso como sustrato para la producción de biogás los cuales describen que a pesar de algo ácido para el proceso utilizando como cosustrato mejora la producción de biogás al combinarlo con estiércol ya sea de vaca o de cabras pero la proporción no debe de sobrepasar el 50% de peso a peso ya que se inhibe la producción de biogás (Battista et al., 2013) por otro lado otro estudio reporta que tomando un 20% de suero como cosustrato se produce más de biogás ya que se lograron pasar de 14.99 ml diarios con agua y estiércol a 30.99 con suero y estiércol y en particular este estudio propone otro método para medir la cantidad de metano en el biogás ya que no se utilizó como tal un aparato solo se reportó que se puede aproximar la cantidad de metano utilizando el tiempo de transferencia de calor tomando como medida 200 ml de agua en donde el gas butano tardó 3.23 minutos en llegar a su punto de ebullición el agua y en el caso del biogás que obtuvieron 5.14 minutos la misma cantidad de agua por lo que pueden decir que en teoría su biogás contiene un 60% (Carlos et al., 2014).

El suero de leche es uno de los sustratos mayor valor para la biodigestión ya que en su mayoría está compuesto por carbohidatos (mayores al 70%)

otros artículos se han centrado en el papel de diversos óxidos metálicos como el óxido de tantalio (TaO_3) , el óxido de niobio (Nb_2O_3) , el óxido de hafnio (HfO_2) y el óxido de tungsteno (WO_2) , como acelerantes en sistemas de biodigestión anaerobia, los cuales mostraron buenos resultados ya que pueden mejorar la estabilidad del sistema de digestión anaerobia y el alto consumo de materia orgánica ya que diversas especies de bacterias involucradas en este proceso se ven beneficiadas logrando una mayor producción de biogás

El uso de óxidos metálicos como la magnetita ha sido ampliamente estudiado “pueden emplearse en la generación de biogás para aumentar la cinética de reacción al potenciar la función catalítica de los microorganismos. También ayuda en la liberación de moléculas biopoliméricas incluyendo proteínas y carbohidratos, la solubilización de materias primas y la alteración química de la materia orgánica” (Uddin J et al 2025)

Por otro lado su uso de catalizadores de hierro ya ha sido estudiado por (A. S. Adekunle et al., 2019) en donde debido a que “el hierro potenció la actividad de las bacterias presentes en el proceso de digestión anaerobia ya que mitigaron la reducción del pH en la reacción y aumentaron la concentración de la demanda química de oxígeno, estimulando la reacción de las bacterias metanogénicas” (A. S. Adekunle et al., 2019). Recientemente se ha estudiado el uso de nanopartículas de magnetita como catalizador en la digestión ya que han demostrado ser eficientes en la eliminación de CO_2 , H_2S_2 en el biogás, además de ser usadas para la eliminación de contaminantes en las aguas residuales, pero aún no han sido del todo estudiados (François et al., 2023).

Se han investigado el papel de diversos óxidos metálicos como el óxido de tantalio (TaO_3) , el óxido de niobio (Nb_2O_3) , el óxido de hafnio (HfO_2)

y el óxido de tungsteno (WO_2), como acelerantes en sistemas de biodigestión anaerobia.

3. HIPÓTESIS

La adición de suero de leche y partículas de magnetita (Fe_3O_4) aumenta la producción y la calidad del biogás en biodigestores con estiércol de vaca.

3.1 Objetivo general

Incrementar la calidad y producción de biogás en un sustrato de estiércol de vaca, agregando suero de leche y/o partículas de magnetita en la digestión anaerobia

3.2 Objetivos particulares

- Determinar la relación suero de leche y partículas de magnetita con sustrato de estiércol de vaca para incrementar la producción biogás en la digestión anaerobia. Escalar y comparar los sustratos (magnetita, suero y estiércol).
- Escalar y comparar los sustratos (magnetita, suero y estiércol).
- Comparar la calidad, cantidad y el tiempo de generación de gas con los diferentes sustratos.

4 MATERIAL Y MÉTODOS

4.1 LUGAR Y CONDICIONES DE REALIZACIÓN

Los experimentos se llevaron a cabo en el campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro con dirección Carretera Chichimequillas. s/n km 1, El Marques. CP: 76265.

Lo primero que se realizó fue la construcción de un contenedor para poder tener los digestores a baño maría ya que como se mencionó es uno de puntos críticos de la biodigestión anaerobia, dicho contenedor constaba de la parte de debajo de un tinaco de 750 L el cual estaba conectado a otro tinaco por medio de conexiones de cpvc ya que se necesitaba tener un suministro de agua suficiente para que no bajara el nivel de agua y se mantuviera constante, de igual forma se conectó un termostato que se encendía y apagaba cuando se registraría una temperatura menor a lo recomendado por Acosta L et al ya que explica que debido a la complejidad de las diferentes fases de la biodigestión anaerobia y los diferentes microorganismos presentes en cada una de estas fases por lo que se recomienda estar entre los rangos de 35 °C a 55°C ya que ha sido reconocido como el rango óptimo para dicho proceso.

Para evitar posibles fallos en el experimento y que las resistencias se quemaran por la falta de agua el sistema se conectó a un tinaco de 250L que por medio de un flotador se iba rellenando el agua conforme bajaba su nivel debido a que existieron pérdidas de agua por evaporación.

Además, se le agregó un emparrillado para evitar que las botellas que las botellas se movieran de su lugar, teniendo un mejor control y poder ubicar de mejor manera las diferentes posiciones de cada tratamiento y cada repetición ya que se utilizó un diseño de experimento al azar para evitar errores por las posiciones de las botellas finalmente al momento de realizar el experimento las botellas se sujetaron al emparrillado con alambre por lo mismo de evitar movimientos como se aprecia en la figura 4.1.



Figura 4.1 acomodo del emparrillado prueba piloto

Para asegurar una temperatura uniforme se hicieron pruebas piloto con botellas con pura agua y se midió la temperatura externa de la botella, así como la interior y la de afuera de la zona de la botella quedando de la siguiente forma.

Se realizaron pruebas piloto de este sistema para garantizar la uniformidad de la temperatura, las cuales consistieron en montar una diagonal en botellas como se puede observar en la imagen y se midieron las temperaturas internas y externas de las botellas donde no se encontró una variación mayor a un 1°C como se muestra en el cuadro 4.2.



Figura 4.2 prueba piloto uniformidad de temperatura

botella	T interior	T exterior	diferencia
1	39.8	40.2	0.4
2	39.5	40	0.5
3	39.6	40	0.4
4	39.8	40	0.2
5	39.8	40.5	0.7

Cuadro 4.1 resultados prueba de temperatura

Para las primeras partes experimentales se utilizaron como biodigestores botellas de pet de 1.25 L ya que el uso de estos envases es ampliamente utilizado para pruebas de laboratorio e inclusive dependiendo del modelo pueden mostrar buenos resultados con casi nulas perdidas de gas como lo explica Sotelo Galfrascoli, L. V., Sogari, N. y Ricciardi, E 2020 en su estudio en donde demuestran que haciendo un buen diseño del digestor las pérdidas de gas son casi nulas y es posible usarlos para experimentos, basándose en este artículo se propuso el diseño de biodigestores con dichas botellas con una capacidad de 1.25L las cuales fueron lavadas y desinfectadas y para minimizar la perdida de gas se cerraron bien y se les realizo una perforación en la tapadera para que la salida de gas fuera un poco más controlada, posteriormente se cubría la salida con bolsas plásticas las cuales eran selladas con cinta de aislar y el gas fuera recolectado con la bolsa.

En la parte de arriba se le colocó un plástico para no dejar pasar la luz y tapar por completo el baño maría.

4.2 Determinar la relación suero de leche y partículas de magnetita con sustrato de estiércol de vaca para incrementar la producción biogás en la digestión anaerobia.

Existen diferentes estudios en los cuales se ha experimentado con la relación estiércol-agua ya que esta concentración puede ser vital para el desarrollo del

producto de interés (biogás) pero según lo reportado por Barrena M, Gamarra O y Maicel J en 2010 donde obtuvieron mejores resultados utilizando una mezcla 1-1 se optó por usar este resultado como base para el experimento, exceptuando el del suero ya que en su caso se cambió el uso de agua por suero.

Para conocer cuál es la mejor relación entre el suero de leche y la magnetita se hizo una prueba a escala laboratorio utilizando como biodigestor botellas de plástico pet de 1.25 L las cuales se lavaron minuciosamente para evitar que quedará algún tipo de residuo y contaminara el experimento, se retiró la etiqueta para una mejor observación de las mezclas, se etiquetaron dependiendo el tratamiento y la repetición correspondiente.

Para el caso del suero de leche se tomó en cuenta los siguientes tratamientos se muestran en el cuadro 4.2.

S20	20% suero 80% agua
S30	30% suero 70% agua
S40	40% suero 60% agua

Cuadro 4.2 tratamientos y porcentajes de suero

Debido a que no ha sido muy estudiado las proporciones en las que se mejora la producción de biogás solo se tomó en cuenta lo reportado por Battista et al., 2013 donde explica que no se debe de pasar del 50% peso a peso ya que se inhibe la producción de biogás. Para el caso de la magnetita se tomarán como referencia el trabajo de (A. S. Adekunle et al., 2019) ya que sus resultados son muy alentadores logrando seis veces más de producción de biogás agregando 10 gr de limadura de hierro en su proceso de biodigestión, tomando en cuenta esto se le agregaron 17 gr de limadura por litro de estiércol entonces los tratamientos fueron: M1, 8 g/kg; M2, 17 g/kg y M3 34 g/kg, el pesado de la magnetita se ve en la figura 4.3.



Figura 4.3 Pesado de magnetita

Este fase del experimento se llevará a cabo por triplicado de cada tratamiento tanto como el de suero y el de magnetita, para tener controlada la temperatura la cual es un punto crítico en la biodigestión anaerobia se colocara todo el lote experimental en medio tambo abierto a la mitad con un emparrillado para que no se muevan las botellas y serán colocados a baño maría con un temperatura de 38°C ya que como dice Antonio&Aguilera la digestión anaerobia puede darse en un amplio rango de temperatura pero hacerla en rango de temperatura mesofílico (30-40°C) hace que sea más estable y haya una fermentación más rápida, el control de la temperatura se hará con un termostato conectado que prenderá o apagará una resistencia que se encuentre en el fondo del contenedor.

Ya tomando en cuenta los tratamientos y con un triplicado de cada uno más un triplicado de control los tratamientos quedaron de la siguiente forma (cuadro 4.3).

T	CONTROL	MAGNETITA 8GR/KG	MAGNETITA 17GR/KG	MAGNETITA 34GR/KG	SUERO AL 20	SUERO AL 30	SUERO AL 40
R1	C1	M11	M21	M31	S20 ₁	S30 ₁	S40 ₁
R2	C2	M12	M22	M32	S20 ₂	S30 ₂	S40 ₂
R3	C3	M13	M23	M33	S20 ₃	S30 ₃	S40 ₃

Cuadro 4.3 Tratamientos y repeticiones



Figura 4.4 etiquetado de tratamientos y repeticiones

Para el acomodo de las botellas se utilizó un diseño al azar con números aleatorios de Google y se fueron acomodando de acuerdo con esto los tratamientos con sus respectivas repeticiones, quedando de la siguiente forma

		S403			C3
	S302	S203	C1	S202	M21
	M13	M22	S303		M23
	S402	S401	S201		M33
M21	C2	M11		M12	S301

Cuadro 4.4 Acomodo de tratamientos en baño María

comparándolo con el emparrillado real como se puede ver en la siguiente foto:



Figura 4.5 Vista general experimento 1

Donde los espacios marcados en gris corresponden a espacios que no se podían utilizar debido a los ladrillos que sostenían el emparrillado o la propia resistencia o el flotador que controlaba el abastecimiento de agua para que no se quedara sin agua el baño maría ya que existía una pérdida por evaporación.

Dicho experimento se montó el día 18 de septiembre del 2024 y se comenzó utilizando como almacenamiento del gas globos, pero conforme avanzó el experimento nos dimos cuenta de que había fugas e inclusive algunos globos comenzaron a presentar rompimiento en donde entraban a la boca de la botella por lo que el 5 de octubre del 2024 se optó por cambiar por bolsas de plásticos selladas con cinta de aislar a la salida de botella.



Figura 4.6 cambio de globos por bolsas

Dicho experimento se dejó correr desde el día del cambio de bolsas hasta el 28 de noviembre, fue monitoreado todos los días y se tomaron mediciones cada semana a partir de la primera aparición de “gas” el día 30 de octubre midiéndose los días 30 de octubre, 6,13,21 y 28 de noviembre, en dichas mediciones se sacaban las botellas del baño maría, se le despegaba la cinta

tratando de evitar que se saliera el gas y se les colocaba un tubin por donde pudiera salir el gas.



Figura 4.7 muestras de biogas

Posteriormente las bolsas fueron sumergidas en una cubeta de 20 L con un volumen conocido de agua y al sumergir la bolsa con el gas se marcó hasta donde subía el nivel de agua y se anotaba la diferencia de volúmenes, esto se hizo con la intención de poder conocer el volumen que producía cada tratamiento en una semana, ya que al multiplicar la diferencia de las marcas de la cubeta por el área de la base de la cubeta se podía conocer el volumen del gas.

Posterior a estas mediciones se hacía una prueba de flama ya que un color azul intenso indicaba una alta concentración de gas metano lo cual hace que el biogás producido fuera de alta calidad



Figura 4.8 flama de biogás

Después de un mes y tres semanas del experimento se realizó un análisis estadístico y se decidió cuáles fueron los mejores tratamientos siendo M1 y S30 (magnetita con 8gr y suero con 30%)

4.3 ESCALAR Y COMPARAR LOS SUSTRATOS (MAGNETITA, SUERO Y ESTIÉRCOL).

Para esta parte experimental se utilizó el mismo baño maría solo que se cambiaron las botellas por 3 reactores hechos con cubetas de 20 L y tuberías de pvc, agregando un sistema de agitación por medio de una pala también de cpvc la cual estaba conectada a un motor el cual era controlado por un timer el cual prendía cada hora por 4 minutos, esto para evitar la sedimentación.

Las concentraciones de magnetita y suero fueron ajustadas de acuerdo con el volumen de estos nuevos digestores quedando de la siguiente manera:

Control 1:1	Magnetita 1:1 120 gr de magnetita	Suero 30%
-------------	-----------------------------------	-----------

Figura 4.5 tratamientos experimento 2

Para el día 16 de abril del 2024 se montó el experimento y se llenaron los digestores con las dosis correspondientes y después de alimentarlos fueron sellados con silicón para garantizar la hermeticidad y una semana después se le colocaron sus bolsas de plástico para capturar el biogás



Figura 4.9 llenado y montado de biodigestores

En esta fase se midió también el pH en cada alimentación tanto de entrada de la nueva solución y el de salida, de igual forma se realizó la prueba de la llama para ver la calidad del biogás.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 PRIMERA FASE EXPERIMENTAL

Los resultados obtenidos se muestran en graficas donde podemos ver la producción de biogás de cada repetición y de cada tratamiento de manera más precisa ya que se puede comparar de mejor manera los volúmenes de gas en cada medición y los títulos de las gráficas corresponden a las fechas 1° 30 de octubre, 2° 6 de noviembre, 3° 13 de noviembre, 4° 21 de noviembre y 5° 30 de noviembre.

Los volúmenes vienen dados en litros

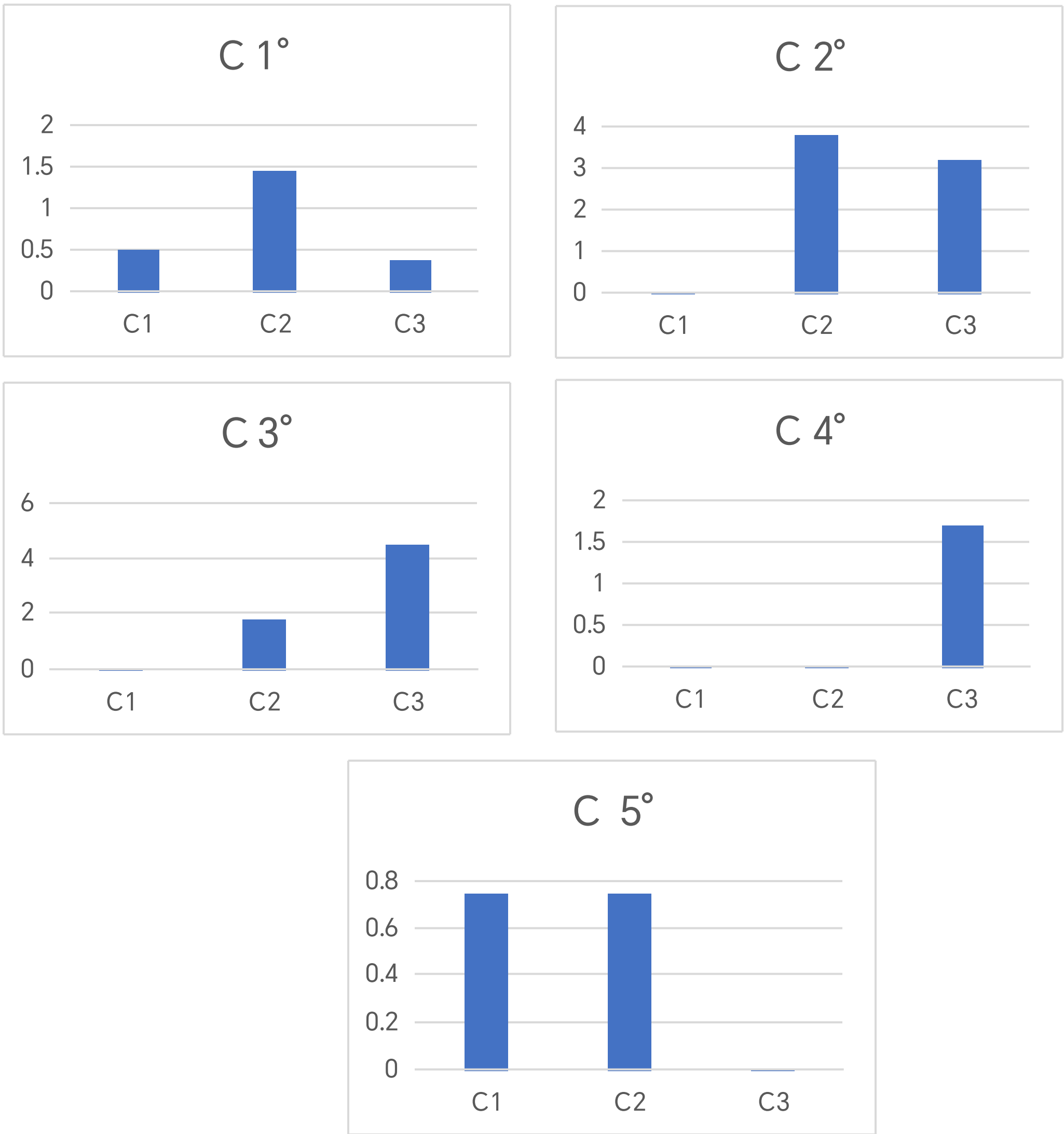
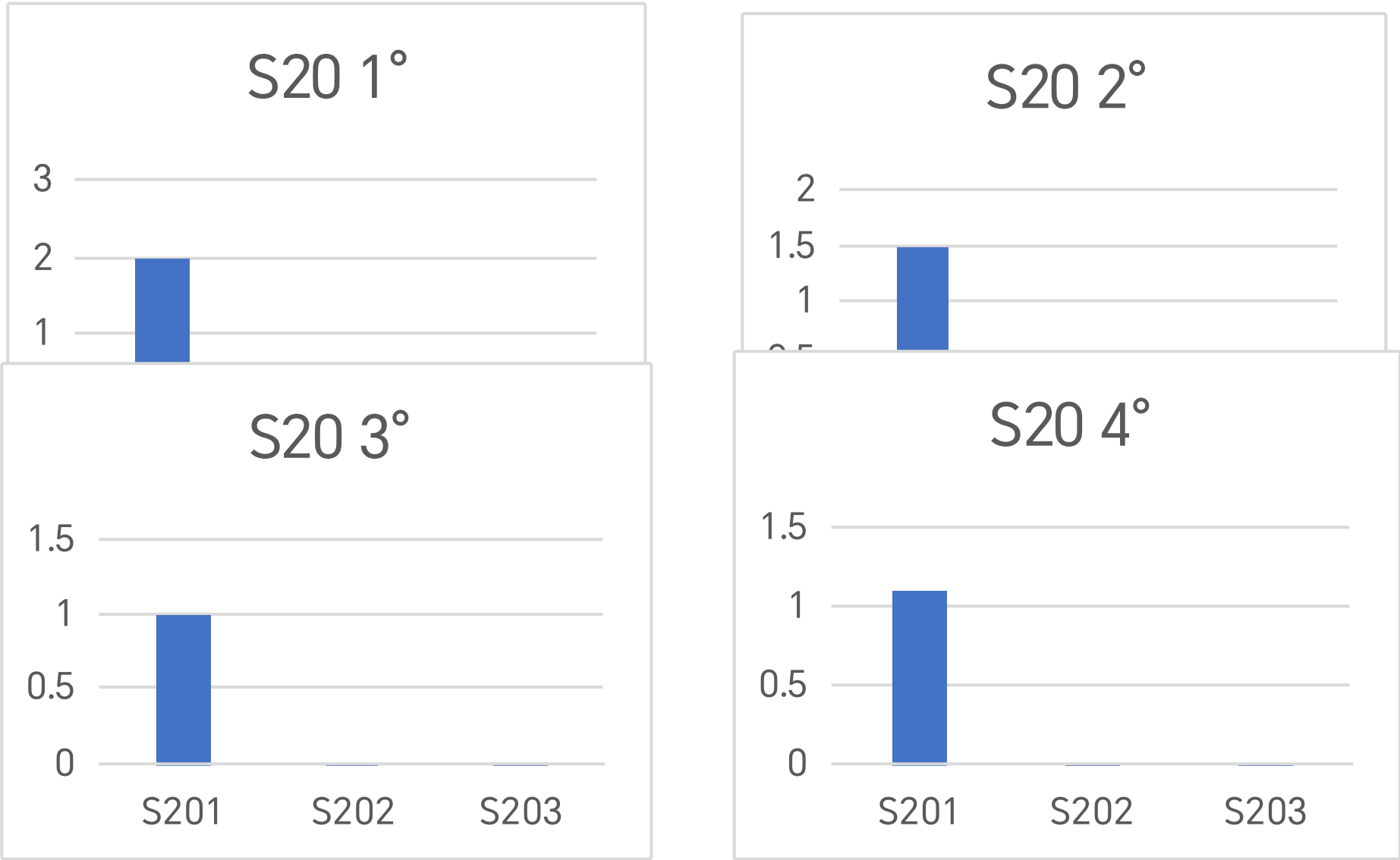


Figura 5.1 Volúmenes producidos por el control

Como se puede observar en el caso del control no hubo un patrón y producción de biogás fue muy dispersa como se ve en la figura 5.1



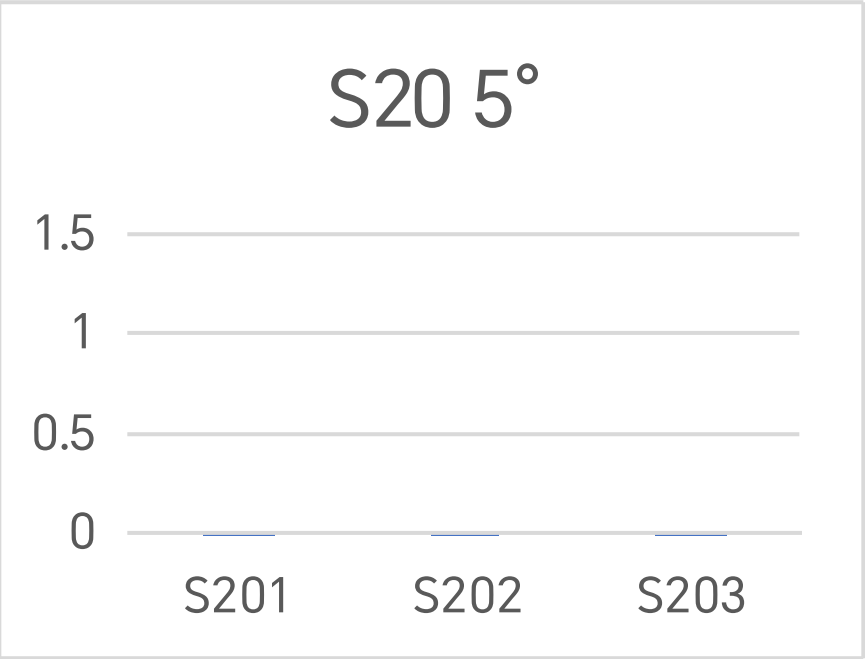


Figura 5.2 volúmenes producidos por el suero a 20%

En el caso del suero se puede ver que al compararlo con el control si hay un incremento en la producción del volumen de biogás tomando en cuenta la información de la figura 5.2

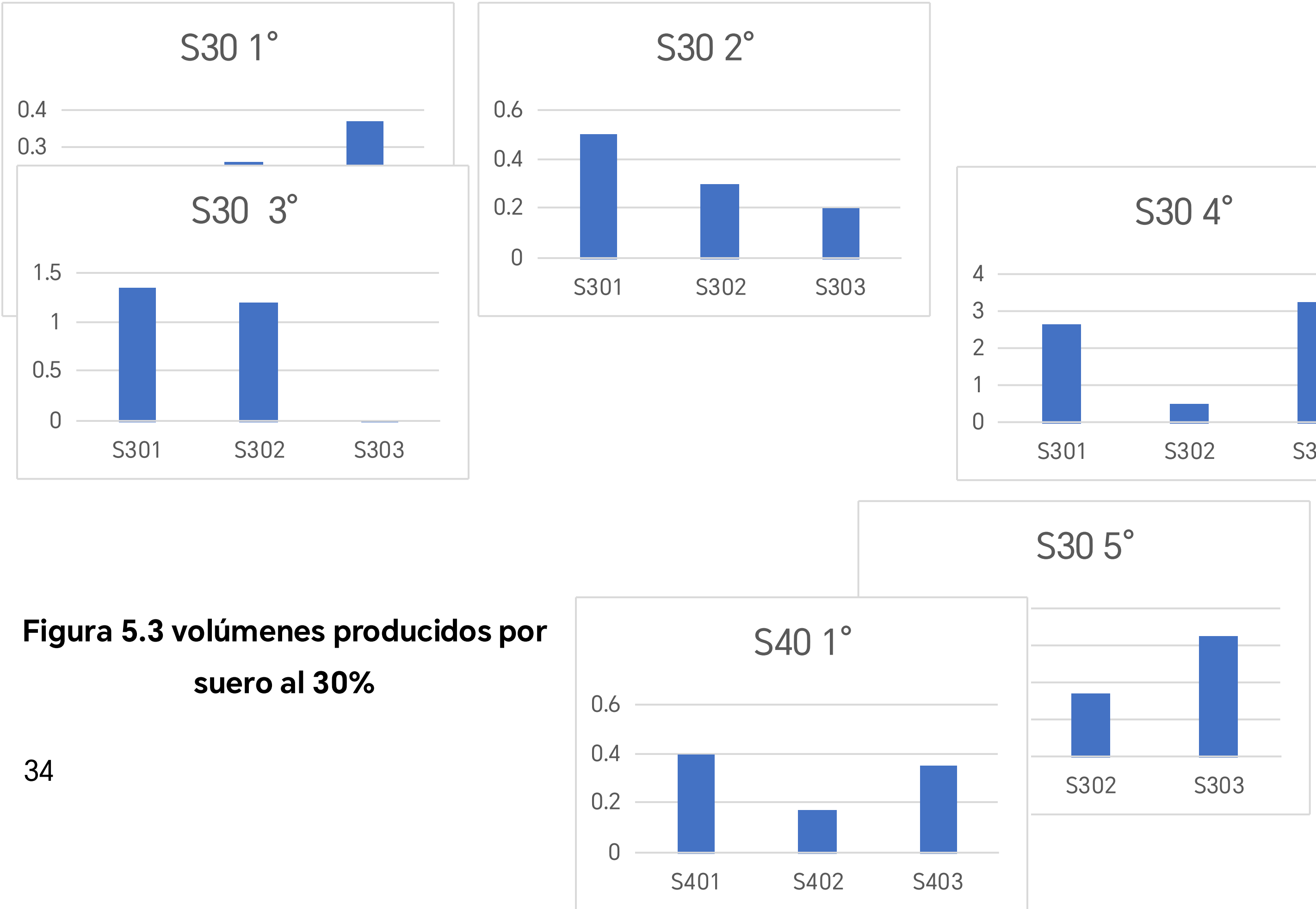


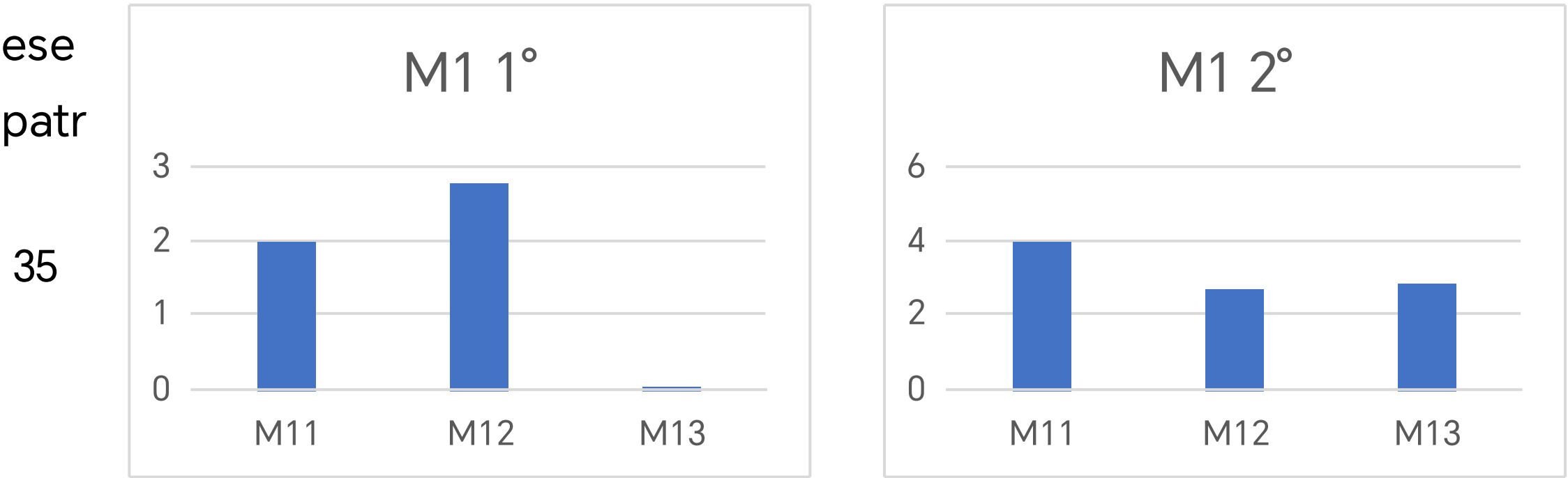
Figura 5.3 volúmenes producidos por suero al 30%

Como se puede observar en la figura 5.3 la producción sigue en crecimiento conforme al suero al 20% hay un incremento considerable ya que subió aun más la producción inclusive se comporta de una manera mas estable ya que en ningún momento se paro la producción como en los casos anteriores, dicho fenómeno es coincidente con lo reportado por Curilla M, Diego P 2022 ya que en su trabajo reportan un comportamiento similar ya que igual entre más aumente la cantidad de suero se aumenta el volumen de biogás.



Figura 5.4 Volúmenes producidos por suero al 40%

En este caso con respecto a la figura 5.4 se puede observar que ya no se sigue ese patrón



ón que se venia presentando ya que al subir al 40% de suero la producción de biogás disminuye lo cual es también explicado por Battista et al., 2013 ya que al acercarse al 50% de suero la producción de biogás disminuye ya que se acidifica la mezcla.

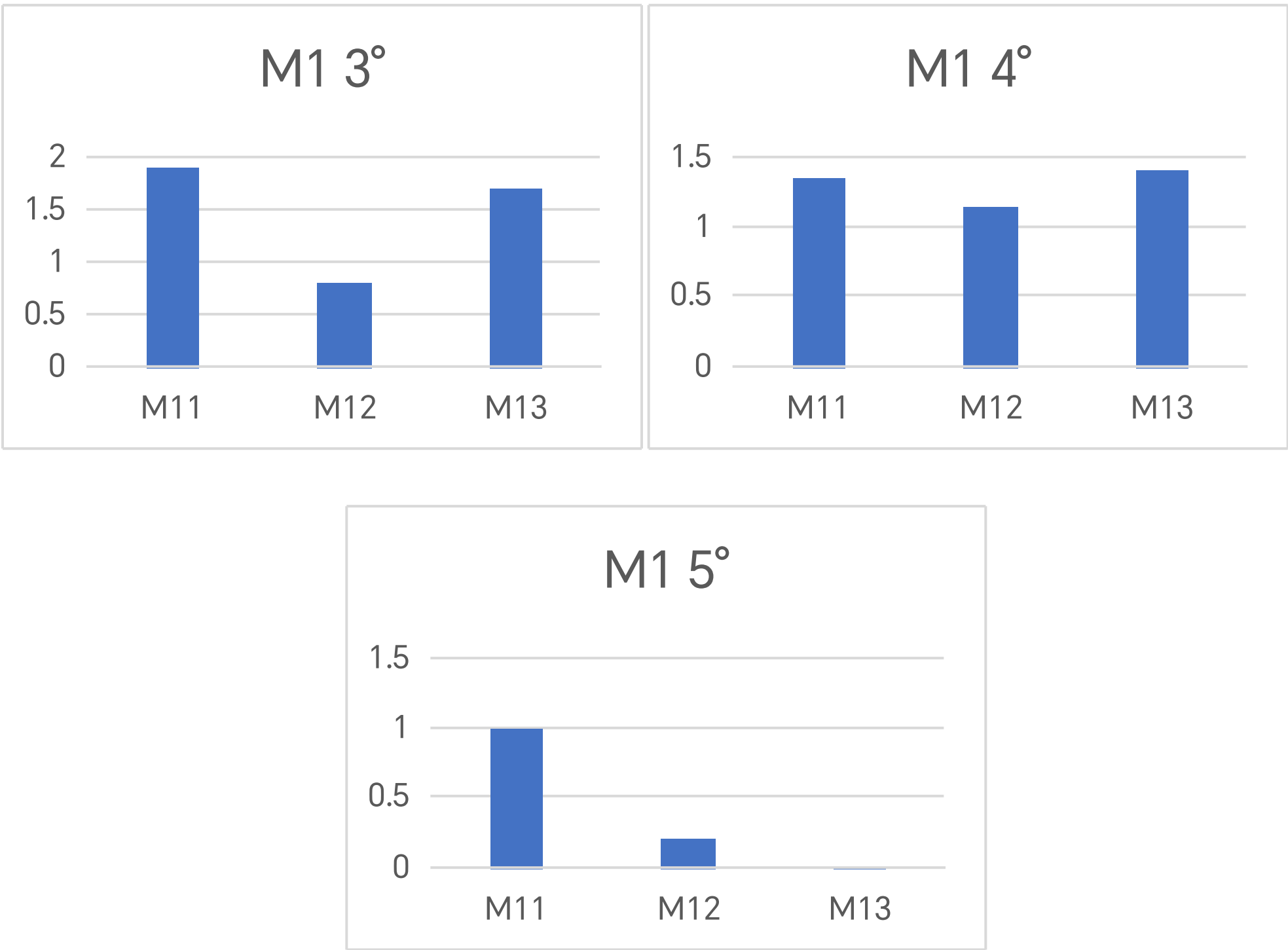
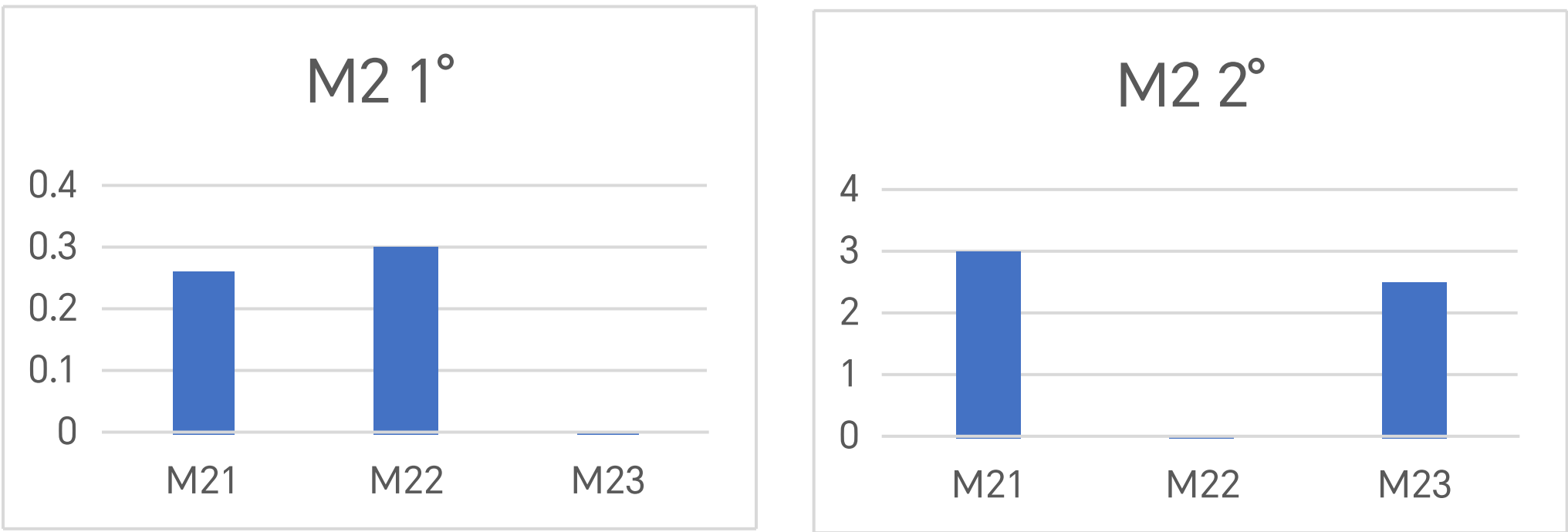


Figura 5.5 producción de volúmenes con 8 gr de magnetita

Comparando los resultados obtenidos de la figura 5.5 con el control es el tratamiento que mas produjo y fue mas estable por ,lo que se eleigio para para la escalada del experimento.



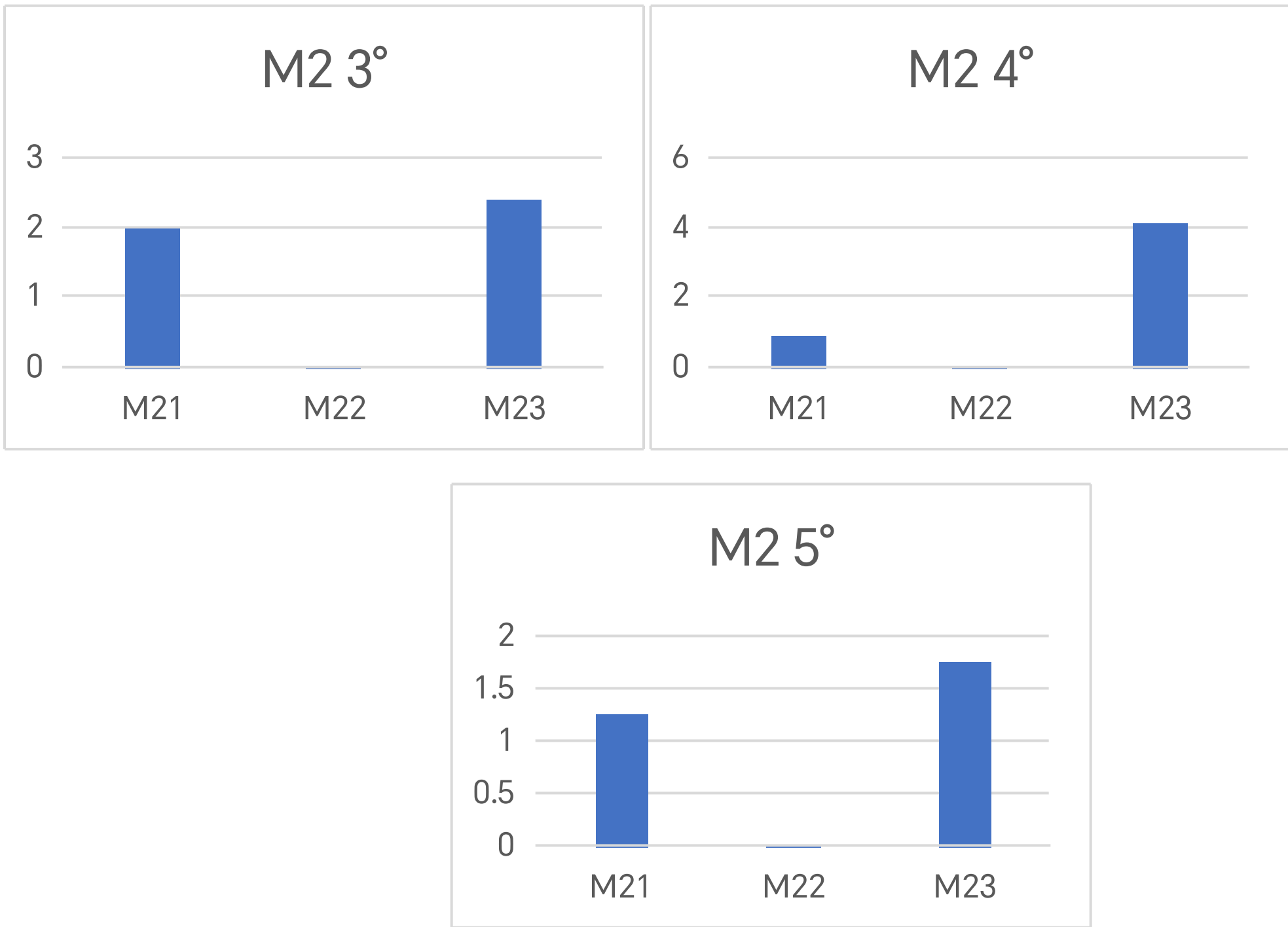


Figura 5.6 volúmenes con 17 gr de magnetita

En este caso como se ve en la figura 5.6 se hizo menor la producción ya que bajo su volumen, lo cual indica que al subir la dosis de magnetita el proceso de biodigestión anaerobia no mejora.

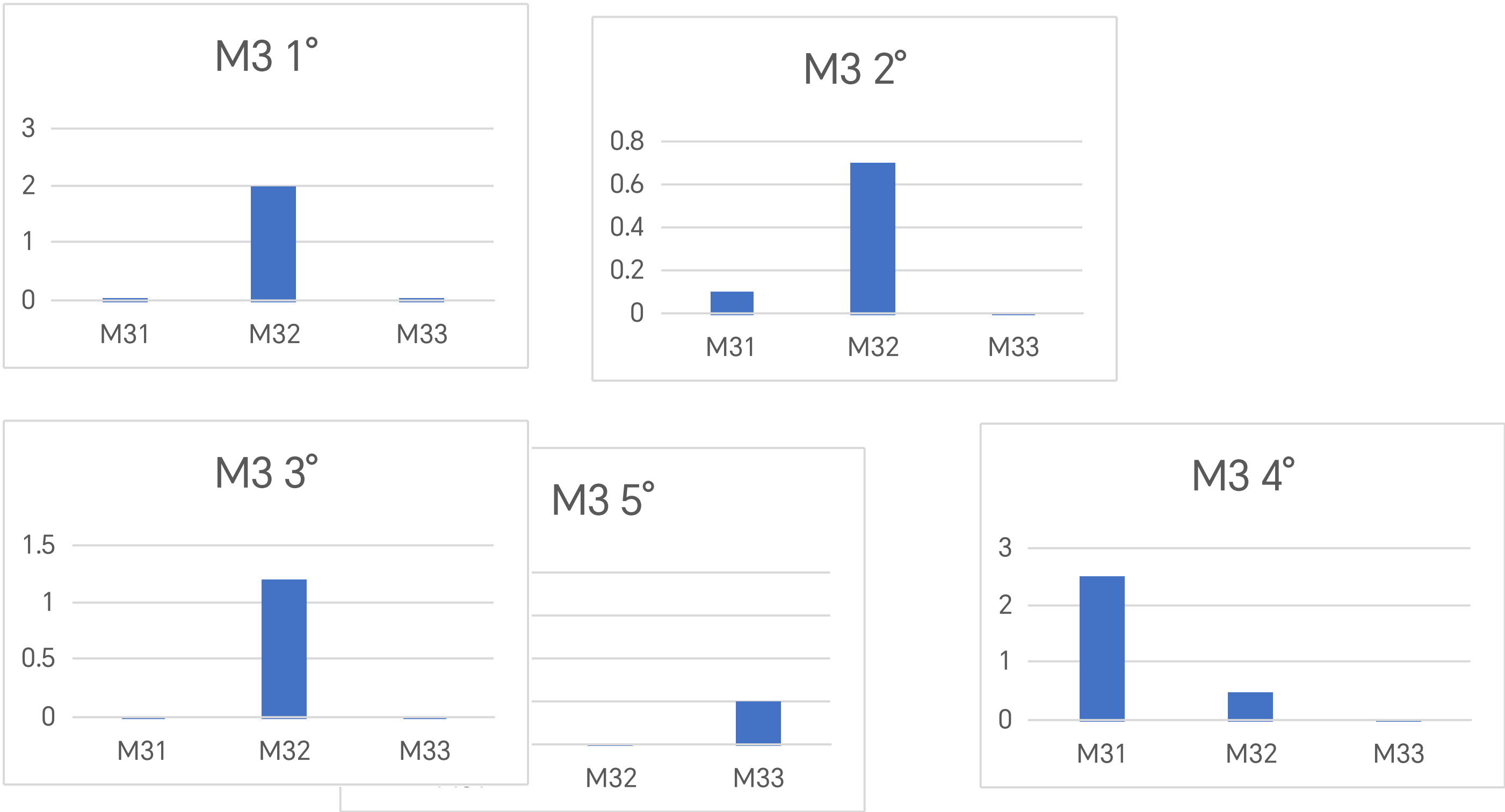


Figura 5.6 volúmenes con 34 gr de magnetita

En este caso como se ve en la figura 5.6 se hizo menor la producción ya que bajo su volumen, lo cual indica que al subir la dosis de magnetita el proceso de biodigestión anaerobia no mejora

5.2 SEGUNDA FASE EXPERIMENTAL

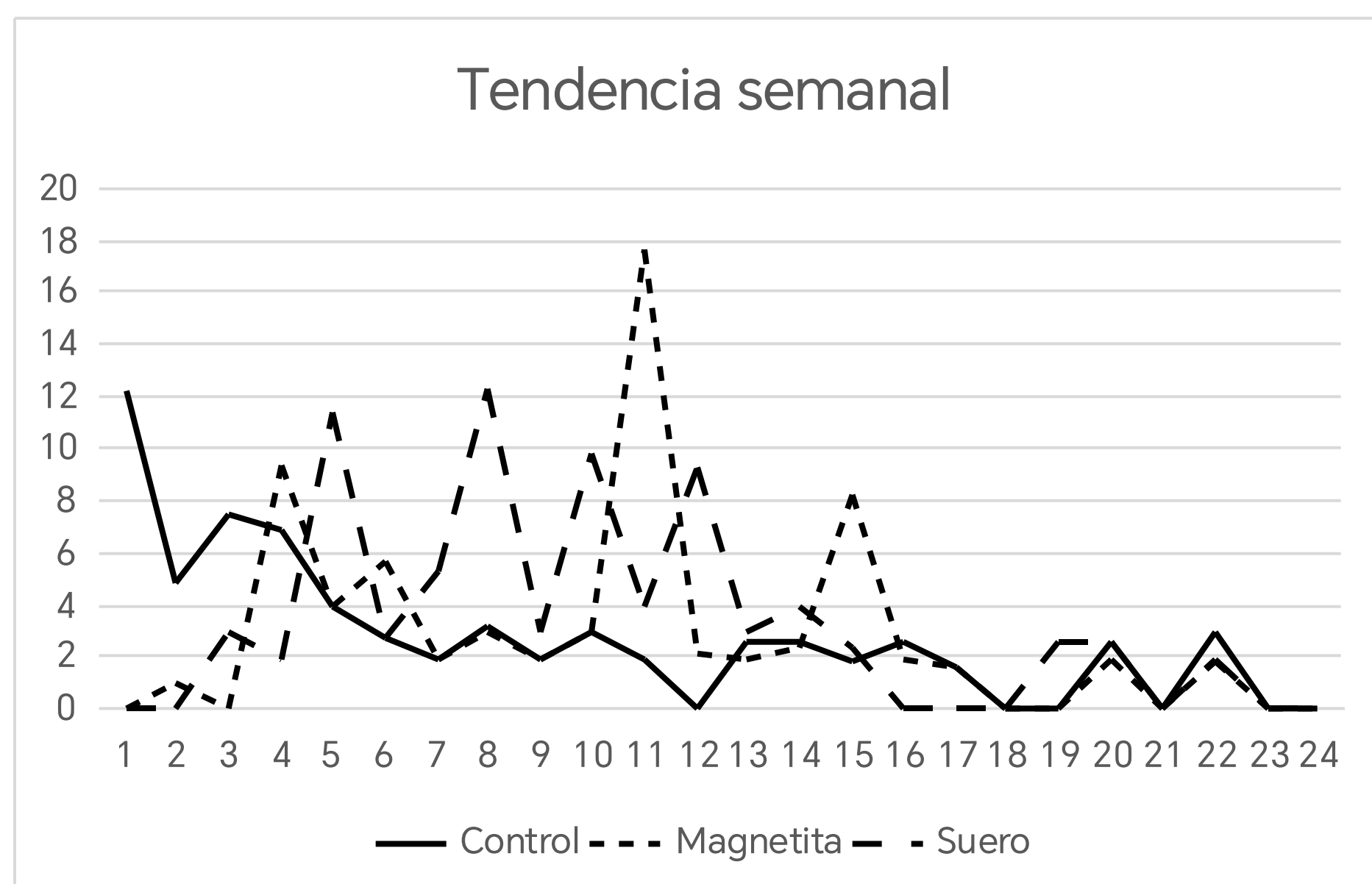


Figura 5.7Tendencia de producción de gas

Con la figura 5.7 se puede observar que el fenómeno se comporta de diferente manera al escalar el tamaño del biodigestor

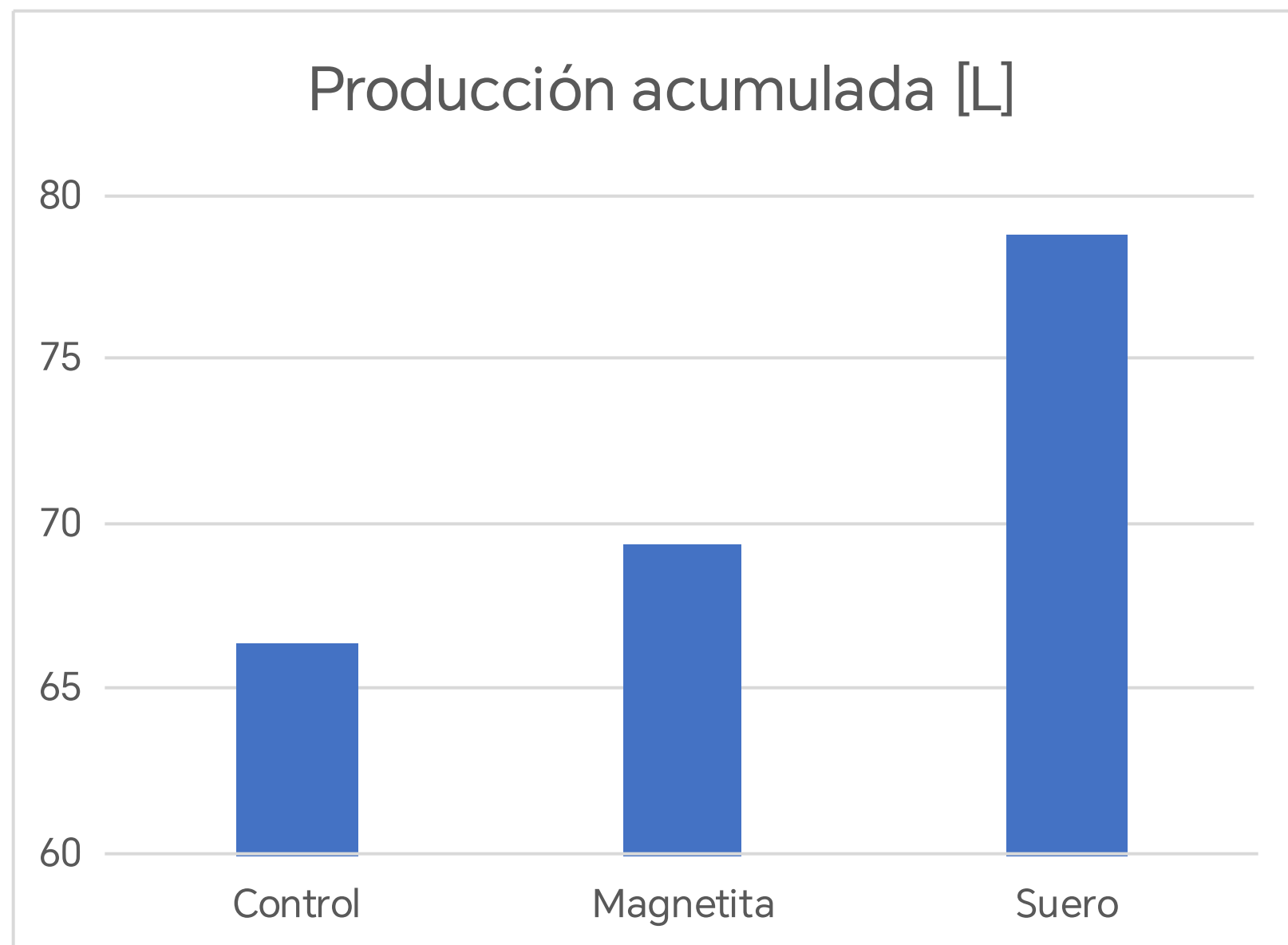


Figura 5.8 Producción acumulada de gas durante las 24 semanas

Con los resultados mostrados por la figura 5.8 esta gráfica se nota que el mejor cosustrato es el suero ya que es con el que mas volumen de biogás produjo.

Discusión

Pese a que los resultados obtenidos en la primera fase experimental de este trabajo no parecen tener un patrón definido podemos decir que la producción de biogás aumenta con la aplicación de suero de leche y magnetita en comparación con el control.

En el caso específico del suero los resultados obtenidos en donde el tratamiento 70% estiércol y 30% suero fuera el que produjo más volumen de biogás es respaldado por el estudio de Velasco M, et al (2025) ya que en su trabajo justamente ese mismo tratamiento funcionó mejor lo cual se atribuye a que la combinación de el estiércol con el suero mejoró la durabilidad y la eficiencia de la producción de metano además de que igual que este trabajo las gráficas de volumen muestra mayor estabilidad cinética lo cual puede sugerir que la presencia del suero ayuda a que las diferentes reacciones y conjuntos bacterianos trabajen de mejor manera. Dicho efecto se le puede atribuir a que dicha combinación mejora la relación de carbono-nitrógeno, el suministro de sustratos además de la sinergia de los sustratos como lo explica.

En el caso de los resultados obtenidos con la magnetita que aumentó la producción de biogás aunque por debajo en comparación con el suero, dicho efecto se le atribuye a que dicho cosustrato promueve la transferencia de electrones en asociaciones con los consorcios bacterianos que son la base de la biodigestión anaerobia como lo explica Charis B. et al (2023) en su estudio ya que muestra que la adición de magnetita estimula precisamente la fase metanogénica de biodigestión anaerobia lo cual es traducido en una mayor producción de biogás.

Existen diferentes porcentajes de incremento de la producción de biogás reportados que van desde 7.3% hasta 90% pero dicha diferencia se explica por Charis B. et al (2023) ya que en su trabajo explica que estas diferencias están ligadas a características de la propia magnetita como lo son su concentración el tamaño de la partícula, por lo que sumado a los resultados obtenidos en este trabajo se puede abrir un nuevo camino de investigación en donde se tomen en cuenta dichos parámetros para obtener mejores resultados ya que se

comprueba que el uso materiales conductores de electrones aceleran la producción de metano como lo fue en el caso de la magnetita.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo con nuestros resultados la adición de magnetita y suero de leche en cogestión con estiércol de vaca aumenta su producción con respecto al estiércol solo, sin embargo, creemos que los resultados no son concluyentes y es necesario seguir evaluando la cogestión bajo esquemas similares.

El avance de la tecnología de los biodigestores y el uso de cosustratos como la magnetita y el suero de leche dan resultados positivos en cuanto a la comparación con el uso del estiércol de vaca solo, ya que la sinergia que presentan estos cosustratos promueve la producción de biogás proveniente de la biodigestión anaerobia pero los retos a vencer o mejorar son: el rompimiento de los diferentes consorcios bacterianos que están involucrados en todo este proceso y la acidificación del sustrato ya que es una parte vital y muy importante del proceso, lo cual puede ser decisivo en los resultados de las diferentes investigaciones.

Por otro lado, también está la parte del uso de los prototipos de biodigestores a los cuales se les pueden hacer algunas modificaciones como uso de sensores internos de temperatura adentro de la cámara de digestión así como sensores de pH internos.

REFERENCIAS

Avila C, (2016) Uso de biodigestores en la industria pecuaria.

Burboa Charis, Vianey Ariadna, Orrantia López, Miriam, & Alvarez Valencia, Luis Humberto. (2023). Materiales conductores de electrones y su impacto durante la producción anaerobia de metano. *Entreciencias: diálogos en la sociedad del conocimiento*, 11(25), e2585046. Epub 11 de marzo de 2024. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2023.25.85046>

Castro-Molano, L. del P., Parrales-Ramírez, Y. A., & Escalante-Hernández, H. (2019). Co-digestión anaerobia de estiércoles bovino, porcino y equino como alternativa para mejorar el potencial energético en digestores domésticos. *Revista ION*, 32(2), 29-39. <https://doi.org/10.18273/revion.v32n2-2019003>

Corona Iván. (2007). *Biodigestores*.

Briñez F, (2025) Planteamientos, medidas y acciones para la reducción de gases de efecto invernadero en la producción de cemento en Colombia y en el mundo. Recuperado de <https://apiescuelaing.bibliolabtech.com/server/api/core/bitstreams/91e6639c-59cc-4efd-a7be-22eb4d5fc758/content>

David, A., Coronel, D., & Delgado Fernández, M. E. (2018). *Universidad politécnica salesiana sede cuenca carrera de ingeniería ambiental*.

Deschamps Leticia, Domínguez Ángel, Vega Adrián, García Ángel, Gonzáles Carlos,

Carmona Dafne, Méndez Enrique, & Ortega Luis. (2020).

GANADERÍA SUSTENTABLE. <http://www.iica.int>

FAO. (2019). *N ° 12 Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) colección documentos técnicos guía teórico-práctica*

sobre el biogás y los biodigestores guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. www.fao.org

Ferrer Y. (2010). *Los microorganismos en la digestión anaerobia y la producción de biogás. Consideraciones en la elección del inóculo para el mejoramiento de la calidad y el rendimiento.* 43(1), 9–20. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120681002>

François, M., Lin, K. S., Rachmadona, N., & Khoo, K. S. (2023). Advancement of nanotechnologies in biogas production and contaminant removal: A review. *Fuel*, 340, 127470. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2023.127470>

González F, P. R. et al. (2017). *Procedimiento de monitorización de biodigestores anaerobios.*

González, M. (2017). *Estudio técnico económico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante digestión anaerobia.*

Jasim Uddin, Rahim Abdur, M. Shahinuzzaman, Md. Nuruzzaman Khan, Mustafizur Rahman Naim, Mohammad Shah Jamal, Mosharof Hossain, Comparative evaluation of metal oxide nanoparticles (Mn₃O₄, NiO, Mn-doped NiO, and SnO₂) on biogas and methane production from cow dung, *Energy Conversion and Management: X*, Volume 28, 2025, 101317, ISSN 2590–1745, <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101317>.

lin Parlina, Asaf Rachmani, Saeid Baroutian ,Anaerobic co-digestion of cream cheese whey and dairy DAF sludge: Effect of inoculum-to-substrate and mixing ratios on biogas production and methane yield, *Journal of Water Process Engineering*, 2026, Volume87, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2026.110061>.

Meegoda, J. N., Li, B., Patel, K., & Wang, L. B. (2018). A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 15, Issue 10). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102224>

Núñez-Pintado, L. (2017.). *Modelamiento y control de proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos y/o*

aguas residuales Esta obra está bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-

SinDerivadas 2.5 Perú Repositorio institucional PIRHUA-Universidad de Piura.

Otieno, E. O., Kiplimo, R., & Mutwiwa, U. (2023). Optimization of anaerobic digestion parameters for biogas production from pineapple wastes co-digested with livestock wastes. *Heliyon*, 9(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14041>

Pagés Díaz, J., & Reyes, I. P. (2017). *Producción de biogás a partir de residuos ricos en grasas y proteínas: sinergia y microbiota*. <https://www.researchgate.net/publication/339065633>

Pérez-Espejo, Rosario H., & Cervantes-Hernández, Gretel I.. (2018). Estrategias de mitigación. El programa de biodigestores en Yucatán, México. *Península*, 13(2), 235-262. Recuperado en 28 de junio de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S187057662018000200235&lng=es&tlng=es.

Rodriguez F. (2020). *Biodigestor compacto*.

Rodríguez M. (2017). *Planta biodigestora escalable para la generación de biogás a partir de purines de ganado*.

Saavedra, R., Zabaleta, G., Víctor, M., Viera, A., Daniel, M., & Aldana, M. (2017). *Diseño de un biodigestor tubular para zonas rurales de la región Piura*.

Schachenmayr, A. :, & Otto, F. (2019). *Universidad nacional del sur departamento de agronomía evaluación de la capacidad del suero lácteo para la producción de biogás*.

Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., & Rosales, M. (2008). *El documento suscrito por*.

Varnero M. (2011). *Manual de biogás*.

Formato Documento Electrónico(APA) Velasco Morales, Marco Arturo, Venegas-Venegas, José Apolonio, Reyes Sosa, Mariela Beatriz, Hernández-Altemirano, Raúl, Mena-Cervantes, Violeta Y., Pinto Ruíz, Rene, López de Paz, Pascual, Meza Avendaño, Carlos Alonso, & Aguilar-Aguilar, Fidel Alejandro. (2024). Sustainable biogas production via anaerobic co-digestion of cheese whey and cattle manure. *Biotecnia*, 26, e2063. Epub 21 de abril de 2025.<https://doi.org/10.18633/biotecnia.v26.2063>