



## ELIMINANDO LO ORGÁNICO DE TU BASURA

Y la obtención de Biogás como una ayuda al problema energético.

La digestión anaeróbica, es un tratamiento que permite eliminar la materia orgánica de los residuos y al mismo tiempo generar un gas que puede ser utilizado como biocombustible. Debido a lo anterior, a las necesidades crecientes de energía, y al aumento sostenible de los residuos generados por la sociedad, hace que esta tecnología sea muy apreciada a nivel mundial. Sin embargo, los digestores que se han desarrollado son muy lentos, tomando entre 20-45 días en su proceso, o bien, los de alta eficiencia son muy caros para implementarlos a nivel industrial y/o municipal. En este trabajo se muestran datos sobre el funcionamiento de un prototipo de laboratorio de un digestor anaeróbico multicámara en desarrollo en la facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Chile, que fue tratado con mezclas líquidas y semisólidas de alta concentración orgánica (10000 y 24300 mg O<sub>2</sub>/l de DBO<sub>5</sub>) con tratamiento por 20 días, o bien, tratado con soluciones líquidas de baja carga orgánica (1200 mg O<sub>2</sub>/l de DBO<sub>5</sub>) pero con un solo día de tratamiento. En todos los resultados se evidencia una buena capacidad de eliminación de la materia orgánica, pero los resultados son mejores a 20 días de tratamiento que con un día, a pesar de tener concentraciones orgánicas 20 veces mayores. Pese a lo anterior, se observa una proyección muy positiva de esta tecnología.

Keywords: Biogás; Digestión anaeróbica; Eficiencia; Prototipo; Residuos líquidos y semisólidos.

La digestión anaeróbica de residuos, es un proceso que se ha estado realizando en el mundo desde ya varias décadas. Los primeros digestores rurales domiciliarios comenzaron en 1860 en la India y desde ahí se han implementado en gran cantidad en India y China. Actualmente, varios países europeos han implementado digestores a nivel industrial y rural para tratamiento de residuos y para generación de energía. En Chile su implementación ha sido lenta, pero destacan proyectos como el de obtención de gas combustible a partir de lodos en planta de tratamiento de aguas servidas en la Farfana (<https://www.aguasandinas.cl/noticias/novedades/aguas-andinas-y-metrogas-inauguran-planta-de-biogas>) y producción de energía eléctrica a desde un relleno sanitario en Til til (<http://www.kdm.cl/energia>).

### INTRODUCCIÓN

La digestión anaeróbica es un proceso microbiológico, realizado por un consorcio de bacterias que trabajan en secuencia, transformando sustancias químicas orgánicas complejas, en pequeñas estructuras químicas gaseosas que forman una mezcla combustible llamada Biogás. Por esta razón, Hay un interés creciente a nivel mundial en

tratar los residuos orgánicos con este tipo de tecnología, lo que disminuye la cantidad de residuos y produce biocombustibles en el proceso.

Este es un proceso microbiológico que ocurre en cuatro etapas claramente establecidas: (Lastella et. Al., 2002, Weiss et.al., 2008)

**a) Hidrólisis de macromoléculas orgánicas** hasta unidades de menor masa molar.

**b) Acidogénesis ó fermentación**, donde transforman los monómeros ó moléculas orgánicas de baja masa molar en ácidos orgánicos volátiles como ácido butírico, ácido propiónico, ácido succínico, alcoholes y agua.

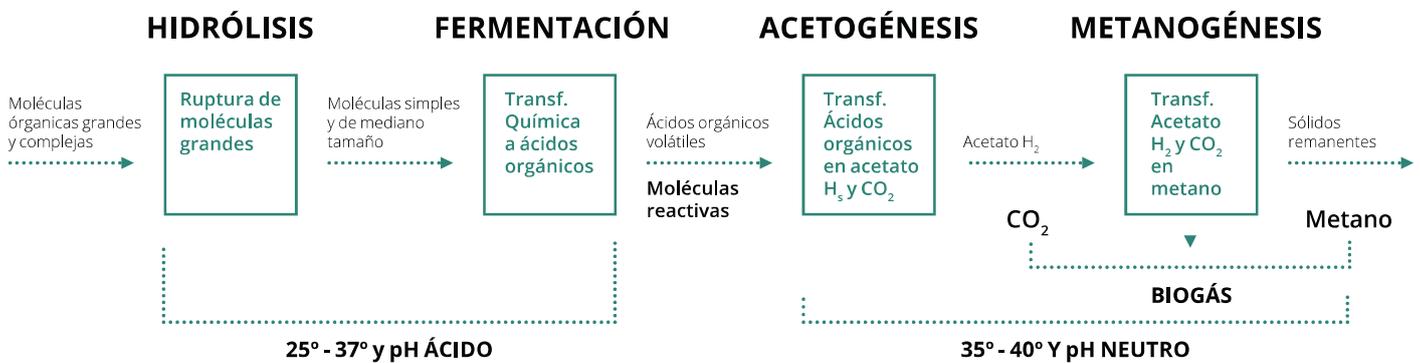
**c) Acetogénesis**, donde los ácidos volátiles derivados de la fermentación anterior son transformados a hidrógeno, dióxido de carbono y acetato.

**d) Metanogénesis**, proceso en el cual se produce metano a partir de acetato y dióxido de carbono e hidrógeno molecular (ver figura 1).

Debido a que la digestión anaerobia es microbiológica, el proceso se ve profundamente afectado por una serie de factores que deben tomarse en cuenta para diseñar un proceso de digestión anaerobia, como: pH, temperatura, concentraciones de nutrientes y sustancias tóxicas.

a) El pH es un factor relevante a considerar, pues toda la digestión ocurre a un pH entre 6,5 y 8; pero un pH bajo 6 o sobre 8,5 inhiben completamente el proceso. La hidrólisis y fermentación trabajan a un pH óptimo de entre 5.5 y 6,5, y debido a que en esta etapa se genera gran cantidad de ácidos orgánicos incluso se puede alcanzar un pH 4. La presencia de bacterias acetogénicas y metanogénicas, disminuyen los ácidos orgánicos, disminuyendo la acidez pudiendo subir el pH hasta valores cercanos a 7. Por otro lado, las bacterias metanogénicas trabajan de forma óptima a un pH entre 6,8-7,2, y un pH bajo 6,5 puede incluso detener la síntesis de metano. Por esta razón, es clave el manejo de acidez en el medio, normalmente el mismo proceso amortigua el pH del sistema, pero si se desea darle eficiencia a la digestión, se deben considerar diferentes requerimientos de pH para cada parte del proceso. (Weiland P., 2010; Parawira et Al., 2005).

b) Con respecto a la temperatura, la síntesis de biogás puede realizarse en condiciones mesófilicas (35°-42°C) o termófilicas (45°-60°C), dependiendo del grupo de microorganismos metanogénicos que se disponga, pero es importante mantener esta temperatura durante el proceso. Las bacterias hidrolíticas-fermentadoras trabajan de forma óptima en condiciones mesófilas, sin embargo, existen microorganismos metanogénicos mesófilos y otros termófilos.



**FIGURA 1**

Diagrama de las cuatro etapas de la digestión anaeróbica, indicando además condiciones de pH y temperatura óptimas para cada etapa. Fuente: Elaboración Propia.

Los microorganismos mesófilos son menos sensibles a cambios de temperatura, permitiendo variaciones térmicas de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  sin afectar la síntesis de metano, además por ser condiciones menos estrictas, es más sencillo mantener estas condiciones en laboratorio y más aún, a nivel industrial. Los microorganismos metanogénicos termófilos son mucho más sensibles a cambios de temperatura, lo que implica un mayor esfuerzo para mantener las temperaturas termófilas de forma estable. El hecho que las condiciones termófilas son mucho más altas que las condiciones ambientales exige un mayor gasto energético en lograr y mantener estas condiciones, lo que complica el diseño de digestores termófilos industriales, sin embargo, las condiciones termófilas han demostrado un mayor rendimiento y calidad del biogás generado, por lo tanto, las condiciones termófilas presentan varios beneficios como: a) mayor contenido de metano en el biogás, b) mayor velocidad del proceso, c) mayor velocidad de transferencia de masa, d) puede ser operada a mayor velocidad de carga, e) la alta temperatura tiene un efecto sanitizante (Weiss et. Al., 2008; Bombardiere et. Al., 2007).

c) En relación a los nutrientes requeridos por la microbiota, se ha determinado una composición óptima de carbono (C): Nitrógeno (N) de 30:1, donde mayores cantidades de nitrógeno pueden afectar aumentando los niveles de amonio inhibiendo el proceso y menores cantidades de N no aportan los nutrientes mínimos para la sobrevivencia de la microbiota. Para mantener esta proporción, los azúcares ó carbohidratos aportan C y las proteínas aportan N. También se necesita fósforo y azufre en una razón de C:P:S de 600:5:1. Además, se requieren otros elementos en cantidades muy pequeñas como hierro, níquel, cobalto, selenio, molibdeno y tungsteno. De estos los más importantes a tener presente es el Hierro con necesidad de entre 1-10 mg/l y níquel, necesario para la metanogénesis con un rango de 0,05-0,06 mg/l. En general, las aguas residuales habitacionales y los lodos no tienen estos elementos por lo que normalmente no son un factor limitante del proceso, pero hay que preocuparse de este punto para RILes (Weiland P., 2010).

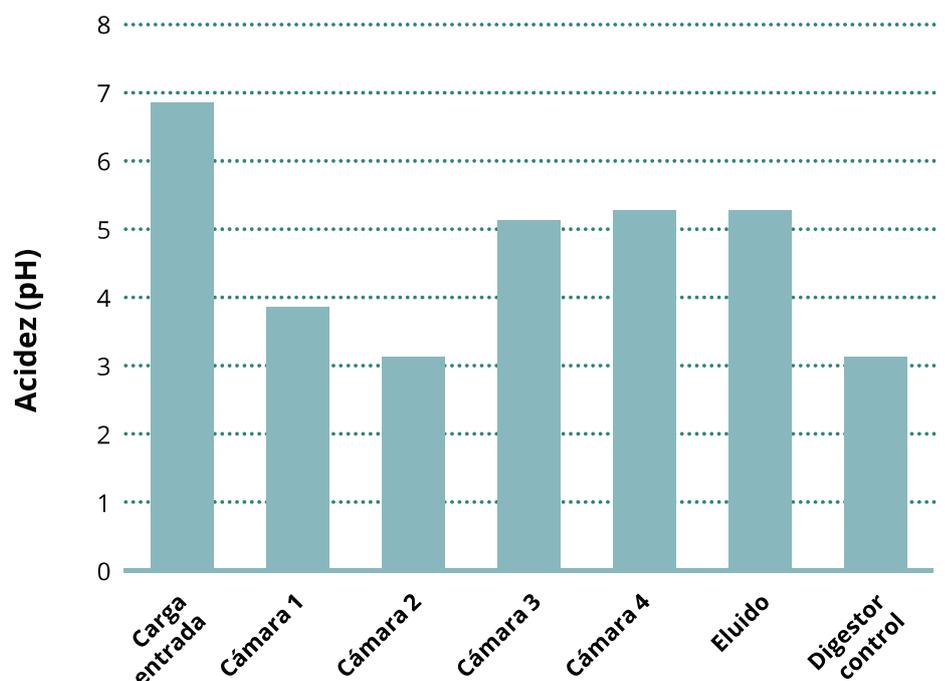
Como se dijo anteriormente, la digestión anaerobia es un proceso muy atractivo y eficiente para el tratamiento de residuos, pues

genera Biogás, el cual puede ser transformado en energía. Sin embargo, este proceso tiene ciertas limitaciones y deficiencias en comparación con otros métodos de tratamiento de residuos. La principal desventaja es el tiempo que toma al proceso completo, el cual según la temperatura a la que se mantenga, puede variar entre 20-45 días en ocurrir, lo que implica que las plantas de tratamiento anaeróbicas deben ser muy grandes para permitir alojar hasta 45 días de residuo en todo momento. Si a esto le sumamos, que al ser un proceso biológico, los digestores deben tener control de temperatura, agitación, pH y nutrientes, permitir sobrecarga microbológica y mantener condiciones anoxidas, una planta de digestión anaeróbica es una planta que puede costar varias veces más que otro sistema de tratamiento de residuos. Debido a lo anterior, la investigación a nivel mundial se centra en el aumento de la eficiencia de la digestión, en el aumento de la calidad del biogás (aumento en el porcentaje de gas metano) y en disminuir los costos del proceso. (Bagi Z.

et. Al, 2007; Kovacs K. et. Al., 2004; Parawira W. et. Al. 2005).

Es de creciente interés, entonces, el poder desarrollar digestores anaeróbicos pequeños pero sustentables y para esto hay que aumentar la eficiencia de la digestión al máximo, pero logrando abaratar los costos de implementación para extender la digestión anaeróbica de residuos a escalas industriales pequeñas para pequeñas industrias o incluso zonas rurales en tratamientos agroindustriales locales.

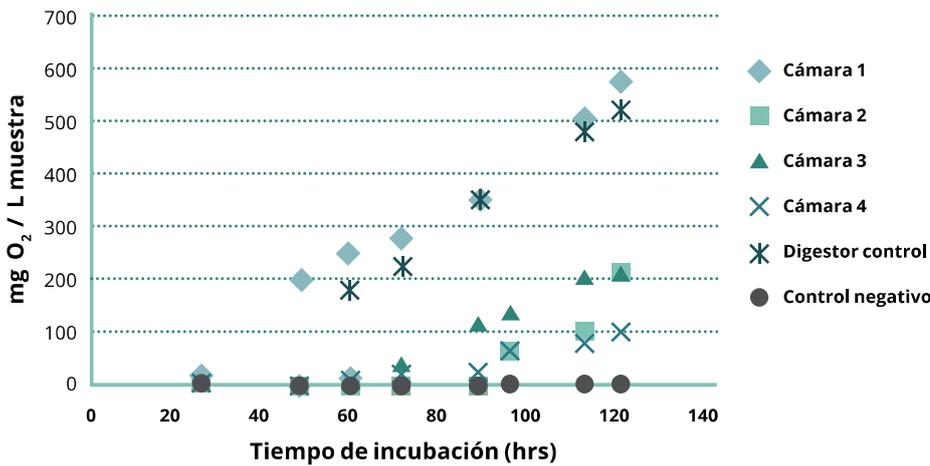
En la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Chile, se ha estado trabajando en el diseño de un digestor anaeróbico económico y altamente eficiente, para tratamiento de residuos líquidos (con concentraciones de sólidos inferiores a 10 g/l) y residuos semisólidos (con concentraciones de sólidos entre 10-200 g/l). Para el diseño de este digestor, se han considerado una serie de características a cumplir:



**FIGURA 2**

Cambio en la acidez de cada cámara del digestor multicámara y control que indica que en cámara 2 hay mayor acidez y cámara 3 hay disminución de esta lo que implica una eliminación de ácidos volátiles.

### Análisis de la disminución del contenido orgánico en las cámaras del digestor por técnica de DBO<sub>5</sub>



	Tiempo (horas)							
	24	48	61	72	88	96	111	120
Cámara 1	27	194	248	275	351	405	513	573
Cámara 2	0	0	0	0	10	64	96	220
Cámara 3	0	0	16	59	124	156	205	227
Cámara 4	0	0	16	32	53	69	80	91
Digestor Control	0	0	173	232	351	400	481	524
Control Negativo	0	0	0	0	0	0	5	5

**FIGURA 3**

Gráfico y tabla que muestra la DBO a distintos tiempos hasta 5 días (DBO<sub>5</sub>), medido en miligramos de O<sub>2</sub> absorbido por cada litro de muestra (mg O<sub>2</sub> / L muestra) de los sobrenadantes de las cuatro cámaras del digestor multicámara y el sobrenadante del digestor control. Se puede observar que la DBO de la cámara 1 llega hasta 5000 mg O<sub>2</sub>/l, valor similar que lo observado en el digestor control (línea negra y marcas celestes). Luego aparece la curva roja de la cámara 2, sin embargo se observa que los puntos no se ajustan correctamente a esta curva logarítmica y podría ser que los valores de esta cámara también se acercan a los valores de la cámara 1.

1) Permitir tratamiento de residuos líquidos con sólidos suspendidos y separar ambos para lograr tratarlos con tiempos de residencia diferentes.

2) Acortar al máximo el tiempo de residencia de la fase líquida, aunque la fase sólida permanezca más tiempo en el digestor.

3) Separar las etapas microbiológicas en cámaras distintas, para mantener condiciones óptimas en cada caso, (primeras dos etapas a pH ácido y temperatura diferente que últimas etapas que además requieren pH neutro).

4) Lograr generar un Biogás de alta calidad. Esto implica una concentración de metano de al menos 70%.

5) Generar un sistema de superficies internas donde las bacterias crezcan y no se intercambien en el proceso. El objetivo es en un futuro trabajar con bacterias seleccionadas o incluso transformadas genéticamente para aumentar la eficiencia, pero que estas bacterias no se intercambien con bacterias que puedan venir en el residuo.

6) Lograr eliminación del contenido orgánico de la fase líquida en un 90%.

7) Eliminar el contenido de la fase sólida en al menos un 80%.

8) Confeccionar el digestor a escala de laboratorio con materiales económicos para que la construcción de un digestor a escala

industrial tenga un bajo costo de construcción

A partir de estas características se diseñaron varios prototipos, lo cuales fueron optimizándose, hasta llegar al digestor actual que aún se encuentra en experimentación y a escala de laboratorio.

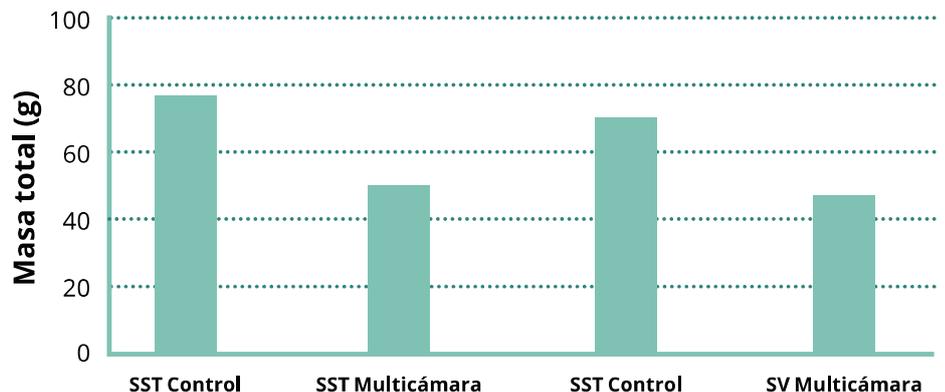
### MATERIALES Y MÉTODOS

**Digestor anaeróbico multicámara:** El digestor anaeróbico multicámara, es un sistema de 4 cámaras de polietileno de 750 ml de volumen cada cámara. La parte superior es abovedada para juntar el gas formado y asegurar escapes hacia los gasómetros por una manguera superior. Cada cámara, posee partículas al interior tipo poliméricas o gravilla tamizada, para permitir que las bacterias se adhieran a su superficie y au-

menten superficie de contacto con el residuo. Los tamaños del tamiz o partículas poliméricas, varían según la cámara. La entrada del afluente hacia cada cámara es inferior y la salida del efluente es superior, por lo que el paso de la muestra por el biofiltro es ascendente y lento con flujo ordenado. En la tapa de la bóveda, junto a la manguera de extracción de gases, hay entradas para toma de muestras y pH.

**Digestor control:** Como digestor control se usó un modelo de digestor tipo mezcla completa, que es el tipo de digestores más comunes que se están utilizando a nivel industrial en Chile. Para este digestor, se ocupó un Matraz Kitazato de 5 l y en la tapa de goma en la entrada superior, se fabricó e instaló un intercambiador de calor tipo serpentín, con un tubo de aluminio de 1 cm de diámetro de 1 m de largo, enrollado para lograr mantener temperatura de trabajo. Este kitazato, se mantuvo agitando con un magneto de 5 cm de longitud con agitador magnético sin temperatura y agitación baja. En la tapa también se dejó una salida de gases hacia un gasómetro, una entrada de muestras que consistió en un tubo de aluminio con el extremo abierto en el fondo del matraz, de forma que la carga de la muestra siempre llegue a la parte inferior y finalmente, una toma de muestras y pH en la parte superior.

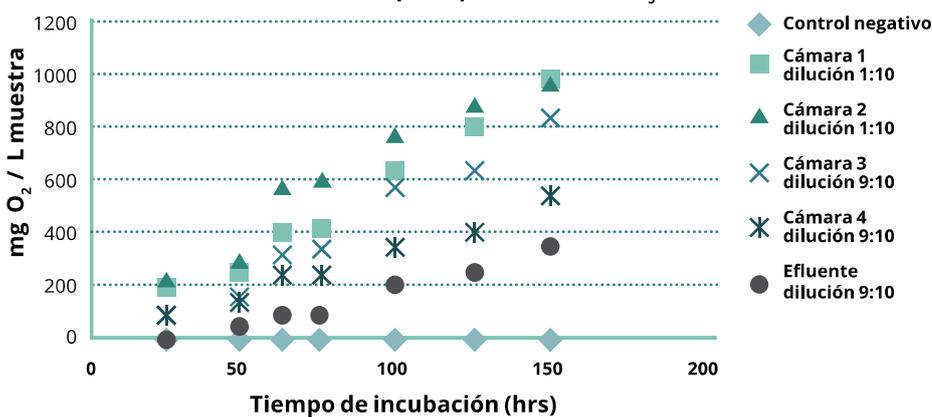
**2.3. Muestras de carga:** Fueron tres muestras diferentes que se experimentaron, para observar comportamiento del digestor frente a diferentes tipos de residuos. La primera muestra, que correspondió a un modelo de residuo con alta carga orgánica, con sólido suspendido y sólido disuelto, se preparó con una mezcla de colado de guagua de pollo con verduras marca Nestlé y azúcar. La mezcla se realizó de tal forma de mantener una relación de C:N de 30:1. El volumen total del digestor fue de 5 Litros, por lo tanto se cargó un volumen de 250 ml diarios de una mezcla de 40 g sólido/litro, lo que correspondió a una demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días (DBO<sub>5</sub>) de 24300 mg O<sub>2</sub>/l. Una segunda muestra ensayada que solo tuvo como objetivo un residuo líquido sin sólidos decantables, de alta carga orgánica. Se preparó con leche líquida entera marca Soprople y azúcar, los que mantuvieron también una relación de



**FIGURA 4**

Masa en gramos de los SST y SV de los digestores control y multicámara de los sólidos decantados por 40 días del experimento. Se logra ver una disminución marcada de los sólidos totales y sólidos volátiles del digestor multicámara con respecto al digestor control (de mezcla completa)

## Análisis de la disminución del contenido orgánico por el digestor multicámara, en residuo líquido por método DBO<sub>5</sub>



	Tiempo (horas)							
	24	26	48	60	72	96	120	144
Control negativo	0	0	0	0	0	0	0	0
Cámara 1 dilución 1:10	0	171	257	402	435	612	788	972
Cámara 2 dilución 1:10	16	205	318	535	578	767	902	951
Cámara 3 dilución 9:10	0	75	161	322	354	542	652	821
Cámara 4 dilución 9:10	0	86	145	232	243	335	410	524
Efluente dilución 9:10	0	32	59	118	124	200	254	340

FIGURA 5

Gráfico y tabla que muestra la DBO<sub>5</sub> (mg O<sub>2</sub> / L muestra) de los sobrenadantes de las cuatro cámaras del digestor multicámara para la digestión de residuos líquidos con leche/azúcar. Se puede observar que la DBO<sub>5</sub> de la cámara 1 llega hasta 9500 mg O<sub>2</sub>/l, valor similar que lo observado en el ensayo anterior que cuantifica el contenido orgánico disponible total de la muestra. Hay que llamar la atención que este gráfico muestra resultados de muestras con diferente dilución, las muestras de las cámaras 1 y 2 tiene una dilución de 1:10, sin embargo las muestras de las cámaras 3, 4 y del efluente final del digestor su dilución es solo 9:10. (Esta dilución es porque en el procedimiento hubo que agregar 10 ml de agua de acequia como carga microbiológica del ensayo DBO).

C:N de 30:1, y una carga orgánica en DBO<sub>5</sub> 10000 mg O<sub>2</sub>/l. Estos dos tipos de modelo de residuos, se entregaron al digestor en volúmenes que permitieron un tiempo de residencia de los residuos líquidos de 20 días, por lo tanto, la carga diaria fue de 175 ml. Finalmente, se preparó una mezcla de bajo contenido orgánico pero solo en sólidos disueltos. En vez de leche y azúcar como la muestra anterior, se cambió con una mezcla de extracto de carne, peptona de carne y cloruro de sodio (medio de crecimiento bacteriano nutritivo pero diluido). El cambio en la muestra se debió a que con leche y azúcar, observamos algo de coagulación en macromoléculas de la leche y se quiso evitar esto cambiando la mezcla. Esta última mezcla, tuvo una DBO<sub>5</sub> de 1200 mg O<sub>2</sub>/l y como el tiempo de residencia fue de un solo día, las cargas diarias fueron de 3,5 l. La incubación en el digestor multicámara y control, fue a temperatura de 36°C ± 1 °C.

**2.4. Demanda Bioquímica de oxígeno a 5 días (DBO<sub>5</sub>):** La determinación de DBO, se realizó en un sistema para determinar DBO marca Velp científica. Se tomó una alícuota de la muestra, y según la carga orgánica contenida, se debió diluir ya que el equipo tiene un límite máximo de detección de 1000 mg O<sub>2</sub>/l. La muestra se complementó con Fe<sup>3+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> y tampón fosfato, llevando todo a pH 6,5-7,5. Finalmente, se sembró con bacterias aeróbicas y para esto se usó agua de acequia tomada en el sector rural de santa Sara en comuna de Lampa. La siembra fue inoculando un 10% del volumen como agua de acequia. Finalmente, se agrega un receptáculo con KOH sólido en escamas

para eliminar CO<sub>2</sub> y se selló la botella con sensores de presión VELP científica. Todo se incubó por 5 días, tomando mediciones cada 24 horas a 20 °C con agitación constante.

### 2.5. Determinación de sólidos sedimentables totales, sólidos totales y sólidos volátiles totales.

**Sólidos secos totales (SST):** Se extrajo y masó 20 ml de alícuota. Se secó en estufa de secado a 90°C por 20 horas (hasta que residuo secó completamente. Esto se comprobó tomando masa e incubando en estufa de secado y comprobando que masa ya no cambió en balanza analítica).

**Sólidos suspendidos (SS):** Se tomó una alícuota de 20 ml y se masó en tubos Falcon de 15 ml. Se centrifugó a 6000 xG y eliminó sobrenadante. El precipitado se secó a 120°C por 30 minutos. Masa se determinó en balanza analítica.

**Sólidos volátiles totales (SV):** Luego de determinar sólidos secos totales o sólidos decantables secos, cada muestra seca se incubó a 550 °C por 3 horas, determinando finalmente la masa de la ceniza remanente. Los sólidos volátiles se determinan al restar la masa de la ceniza a la masa de SST.

## 3. RESULTADOS

**3.1 Separación de los procesos microbiológicos anaeróbicos en cámaras diferentes:** El digestor multicámara se ensayó en un comienzo con una mezcla con alto contenido orgánico, una DBO<sub>5</sub> de 24300 mg

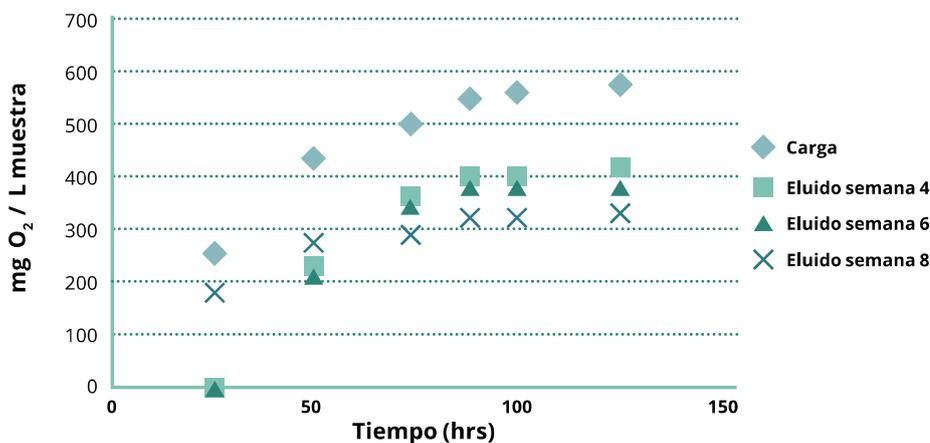
O<sub>2</sub>/l. Esta mezcla incluyó material orgánico disuelto y sólidos suspendidos y el tiempo de residencia de la fase líquida fue de 20 días y la de la fase sólida fue de 40 días. Cada digestor: control y multicámara, se sembró con bacterias derivadas de excremento de vaca. Luego se administró residuo por 45 días para estabilizar ambos digestores a 37°C constante. Después de la estabilización, se comenzó el ensayo el cuál duró 40 días.

La primera observación sobre el digestor multicámara, fue que al evaluar acidez de cada cámara, mostró diferentes pH. Ya en la primera cámara se apreció un pH muy ácido de 3,7 lo que implica que hubo una fermentación intensa en esta cámara. La cámara 2 mostró un pH aún más bajo, de 3,2 y un olor a ácidos orgánicos volátiles muy fuertes que indican que la fermentación fue mayor en esta segunda cámara. La cámara 3 aumentó mucho el pH, llegando a 5,3, lo que implica una importante disminución de ácidos orgánicos volátiles, todo lo cual fue corroborado por titulación con base fuerte. El olor a ácido orgánico también disminuyó importantemente. Finalmente, la cámara 4 mostró un pH de 5,4, lo que muestra que en esta cámara ya no se continuó disminuyendo los ácidos volátiles. Sin embargo, en esta cuarta cámara, se generó gas metano, el cual pudo corroborarse al encenderse con un encendedor. Este gas solo se produjo en la cámara 4, por otro lado, en la cámara 3 si hay presencia de gases, pero este gas no se encendió. Todo lo anterior sugiere que las bacterias separaron sus procesos donde las primeras dos cámaras concentran bacterias reductoras y fermentadoras y la tercera claramente concentra las bacterias acetogénicas y solo aparecieron bacterias metanogénicas en la última cámara. Cuando se observó el digestor control, este al estar en una sola cámara, mostró un único pH, de 3,3. En este caso se tomaron muestras a diferentes alturas del digestor, pero el pH fue homogéneo en este (Figura 2).

### 3.2 Eliminación de materia orgánica de residuos con alta carga orgánica con tiempos de residencia de 20 días:

A continuación se determinó la capacidad de este digestor para eliminar materia orgánica del residuo. Para esto, se determinó el contenido orgánico de la fase líquida por DBO<sub>5</sub> y de la fase sólida por sólidos secos totales y sólidos volátiles. El gráfico muestra la DBO de muestras diluidas 10 veces, por lo que la DBO<sub>5</sub> final hay que multiplicarla por 10. Tal como se observa en el gráfico, a pesar de que el residuo total presentó una DBO<sub>5</sub> de 24000 mg O<sub>2</sub>/l, ya en el sobrenadante de la cámara 1 la DBO<sub>5</sub> solo fue de 6000 mg O<sub>2</sub>/l, y en la cámara 4 la DBO<sub>5</sub> bajo a menos de 1000 mg O<sub>2</sub>/l, lo que implica una reducción mayor al 80% del contenido orgánico entre la primera cámara y la cuarta. Por otro lado, El digestor control, muestra una DBO<sub>5</sub> igual que la contenida en la cámara 1 del digestor multicámara (figura 3).

Al analizar la fase sólida decantada en la cámara 1 del digestor multicámara o del digestor control, se determinó que los sólidos secos totales del digestor control correspondieron a 77,25 g totales, de los cuales



	Tiempo (horas)						
	18	24	48	72	88	96	120
Carga	124	254	432	502	540	551	578
Eluido semana 4	5	5	225	365	397	402	418
Eluido semana 6	10	10	210	351	373	373	383
Eluido semana 8	80	182	273	290	316	322	333

**FIGURA 6**  
Análisis de la disminución de DBO<sub>5</sub> por tratamiento de residuos con un día de retención en el digestor multicámara con cargas iniciales de residuo líquido con 1200 mg O<sub>2</sub>/l. Cada muestra tiene una dilución de 1:2, por lo que la DBO que aparece en los gráficos, hay que multiplicarla por dos para tener el valor real. El gráfico muestra que a medida que pasan las semanas de funcionamiento del digestor, este está aún estabilizándose y mejorando el proceso, logrando una reducción desde una DBO<sub>5</sub> de 1200 hasta 700 mg O<sub>2</sub>/l.

72,28 g correspondieron a sólidos volátiles. Sin embargo, en el digestor multicámara, los sólidos secos totales correspondieron a 50,4g, donde los sólidos volátiles correspondieron a 46,88 g. Todo lo anterior muestra que el digestor multicámara, logra una reducción del 34,8 % de los sólidos totales decantados con respecto al digestor control, y a una disminución del 35.1% de los sólidos volátiles en comparación al digestor control. Todos los resultados, indican que a estas condiciones, el digestor de mezcla completa, se satura y la digestión anaeróbica se detiene, pero por otro lado, el digestor multicámara muestra robustez en su función, logrando soportar cargas orgánicas elevadas y evidenciando una gran eliminación de materia orgánica en la fase líquida aunque aún no una adecuada eliminación de carga orgánica de la fase sólida. Otra observación es que este digestor muestra evidencia de separación de los procesos microbiológicos de la digestión anaeróbica en las cuatro cámaras. Los sólidos decantados, solo se encontraron en la cámara 1 y el hecho que estos hayan disminuido, indican que existió actividad reductora, además fermentación. En la cámara 2 aumenta la fermentación y acidogénesis, aunque no podemos descartar actividad reductora. En la cámara 3 el aumento drástico del pH demuestra disminución de ácidos orgánicos volátiles, lo que debería ocurrir por acetogénesis. El hecho de que exista una disminución de DBO<sub>5</sub> y aparición de gas combustible en la cámara 4, además de no cambiar pH con respecto a cámara 3, indica que acá hay una actividad mayoritariamente metanogénica (Figura 4).

Como se observó que a pesar de que la carga inicial fue de 24000 mg O<sub>2</sub>/l, gran parte de la materia orgánica decantó, quedando una carga orgánica disuelta de solo 6000 mg O<sub>2</sub>/l, se quiso generar otro tipo de muestra

a ensayar, con una mayor concentración orgánica disuelta, pero sin sólido decantable. En este segundo ensayo, se preparó una solución de agua, leche entera y azúcar, manteniendo la relación C:N de 30:1. En esta carga se logró una DBO<sub>5</sub> de 10000 mg O<sub>2</sub>/l. y se estabilizó el sistema por un mes, para luego se comenzó el experimento. Cuando se analizaron las cámaras, la Cámara 1 mostró un pH 3.1, consecuente con el ensayo anterior, solo que acá toda la materia orgánica estaba disuelta, por lo tanto, la fermentación fue mayor. La cámara 2 con pH 2.9, sigue mostrando una mayor acidogénesis en la segunda cámara. La tercera cámara tuvo un pH de 5.3, consecuente con los resultados anteriores, donde en la tercera cámara hay una eliminación marcada de ácidos orgánicos volátiles. La cámara 4 mostró un pH de 5,8, y en este caso se observa que en cámara 4 continuo disminuyendo en ácido del medio.

Al observar la DBO<sub>5</sub>, se observa que las cámaras 1 y 2 las cuales están diluidas 10 veces para el ensayo DBO, muestran valores de 10000 mgO<sub>2</sub>/l, lo que es consecuente con la carga inicial. Sin embargo, la cámara 4 que no tienen una mayor dilución, sino 9:10, disminuye marcadamente la DBO<sub>5</sub>, llegando en la cámara 4 a 450 mg O<sub>2</sub>/l (9/10 de 500 mg O<sub>2</sub>/l) y en el eluido, o lo que sale fuera del digestor de 267 mg O<sub>2</sub>/l, es decir una disminución del 97 % de la DBO<sub>5</sub>. Sin embargo, hay que aclarar que estos ensayos tienen un tiempo de residencia o en este caso tiempo de retención hidráulico de 20 días, lo que muestra un proceso eficiente pero muy lento (Figura 5).

**3.3 Eliminación de contenido orgánico en residuos de baja carga orgánica pero con tiempos de residencia de un día:** Finalmente, se desea probar el efecto de residuos con bajas cargas orgánicas similares a las aguas servidas domiciliarias para evaluar este digestor, para el tratamiento de aguas

residuales domiciliarias o municipales. Debido a que las aguas residuales domiciliarias son tratadas por bacterias aeróbicas que permiten tiempos de residencias bajos para la fase líquida o línea de aguas, menores a un día, se quiso probar el funcionamiento de este digestor para un residuo con sólidos disueltos y una DBO<sub>5</sub> de 1000 mg O<sub>2</sub>/l pero con solo un día de incubación en el digestor.

Para la carga, se utilizó extracto de carne y peptona de carne (derivado de medios de cultivo microbiológico) pero asegurando DBO<sub>5</sub> constante que resulto en 1200 mg O<sub>2</sub>/l. Luego de una estabilización de dos meses, con esta carga y tiempo de residencia de 1 día, se comenzó el ensayo. Con esta carga, los pH de las cámaras fueron muy diferentes a lo observado en ensayos anteriores. La Cámara 1 mostro un pH de 6.7, pH similar al de la cámara 2. Sin embargo la cámara 3 mostró un pH de 6,98 y la cámara 4 un pH de 7,12. Esto sugiere que al igual que en ensayos anteriores, la reducción y acidogénesis, sigue ocurriendo en las primeras dos cámaras, y la acetogénesis y metanogénesis en la tercera y cuarta cámara.

El análisis de la DBO<sub>5</sub>, muestra que el digestor luego de tres meses de experimento, posterior a la estabilización del digestor, aún se está ajustando. Al primer mes del experimento, el digestor logró un 27% de reducción de DBO<sub>5</sub>. Luego de seis semanas de funcionamiento, el digestor alcanzó una reducción del 33% en la DBO<sub>5</sub>. Finalmente, luego de ocho semanas de ensayo, el digestor logró un 42,6% de reducción de la DBO<sub>5</sub> (Figura 6).

En estos ensayos y luego de los tres meses de estabilización y los dos meses del ensayo, se logró obtener biogás derivado de cada una de las cámaras siguiendo la producción por dos semanas. La cámara 1 no generó gas. La cámara 2, generó gas con un promedio de 95 ml/día. La cámara 3 generó un promedio de 30 ml/día y la cámara 4 generó un promedio de 185 ml de gas/día. Se determinó el poder calorífico de los diferentes gases y no se apreciaron diferencias entre los gases derivados de la cámara 2, 3 y la 4.

## DISCUSIÓN

El digestor multicámara, es un proyecto de innovación que aún se está optimizando en la facultad y tiene dos objetivos a corto plazo. El primero es dar una solución a problemas de tratamiento de aguas servidas municipales en zonas rurales. Estas zonas no están cubiertas en políticas de saneamiento y cualquier planta de tratamiento tiene altos costos de construcción y mantenimiento, que deben cubrir municipalidades o de forma particular, y por lo tanto, estas zonas tienen baja cobertura de saneamiento. Por esto se está diseñando un digestor que pueda hacerse cargo de aguas servidas, las que contienen un bajo volumen de sólido sedimentable y un gran volumen de agua con carga orgánica baja disuelta de entre 500-1500 mg O<sub>2</sub>/l, que además, por el alto volumen debe tratarse rápidamente. Debido

a esto se logró diseñar un digestor que logró separar la fase sólida y la fase líquida y aún más, tratar ambas con tiempos distintos. Los resultados muestran que se ha logrado un tratamiento de la fase líquida con cargas orgánicas de 1200 mg O<sub>2</sub>/l de DBO<sub>5</sub>, pero aún el tratamiento es poco eficiente. Tal como se observa en los resultados, este digestor trabaja con cuatro cámaras diferentes, que han evidenciado tener una actividad microbológica diferente cada una. Esto implica que este digestor puede ser estudiado de forma modular, es decir, tratar cada cámara como etapa del proceso de digestión anaeróbica, y por lo tanto, identificar etapas limitantes para finalmente eliminar este cuello de botella del proceso. Se ha descrito que de las cuatro etapas de la digestión anaeróbica, la etapa de reducción puede ser limitante (Rosenkranz F. 2013). Esto calza con los resultados obtenidos. En los primeros ensayos, a pesar de tener cargas orgánicas altas, la eliminación de la ateria orgánica fue muy eficiente, debido a que el tiempo de residencia fue de 20 días. Esto implica que la muestra mantuvo contacto con las bacterias anaeróbicas por todo ese tiempo. Cuando el tiempo de residencia bajo a un día, bajo inmediatamente la eficiencia, a pesar de que la disminución de la materia orgánica fue de 10-20 veces. Esto implica que el problema no fue de concentración de materia orgánica sino de velocidad del proceso microbológico. Con esto no queda claro si el problema de velocidad de reacción fue de una etapa microbológica o de todas las bacterias, pero por observaciones en laboratorio, donde en momentos de carga de materia orgánica en digestores, rápidamente se mueve el líquido interior entre cámaras y comienza de forma automática la producción de biogás, pero no se observa una acidificación del residuo tan rápida en la cámara 1. Lo anterior implica que la parte más lenta está entre el residuo inicial y la transformación de este a ácidos orgánicos y no en acetogénesis y metanogénesis. Si se logra evidenciar completamente que la etapa inicial es la limitante, la cual se concentra en la cámara 1, podríamos superar este problema incluyendo una segunda o incluso una tercera cámara 1 en paralelo, que converjan sus efluentes a una única cámara 2. Lo que aumentaría la eficiencia del proceso sin cambiar completamente el volumen del digestor. Resolviendo este aspecto de eficiencia, se puede tener una solución factible y muy necesaria en zonas rurales. Anteriormente se ha evaluado el beneficio económico en la construcción de este digestor en comparación con los sistemas tradicionales, por lo que ya existe evidencia de la factibilidad económica de implementación de este digestor en zonas rurales (Fernandez C. y Gonzalez R., 2014)

El segundo objetivo con este digestor, es lograr un digestor anaeróbico transportable y de fácil instalación para utilización en diversas industrias con RILes de alta carga orgánica. El digestor anaeróbico multicámara, al funcionar además como sistema modular, puede ser transportado por parte y de fácil instalación al ser construidos con recipientes de polietileno de diferentes volúmenes según la necesidad. Esto permite construir las

plantas de tratamiento en la fábrica y luego, llevarla desarmada a la zona de utilización, lo que tiene varias ventajas. Otro aspecto interesante es que al ser un sistema modular, si una de las cámaras falla, no se debe detener el proceso por mucho tiempo, y se puede simplemente intercambiar la cámara en falla por otra en funcionamiento. Para tener este digestor multicámara modular transportable, se deben realizar algunos nuevos ensayos, pero ya se observa que este digestor permite altas cargas orgánicas y permite tratamiento de residuos líquidos o residuos semisólidos con una muy buena eficiencia en el tratamiento.

## BIBLIOGRAFÍA

Bagi Z., Acs N., Bálint B., Horvath L., Dobó K., Perei K., Rakhely G., Kovacs K. (2007) *Biotechnological intensification of biogas production. Applied of Microbiology and Biotechnology*. 76, pags. 476- 482. DOI:10.1007/s00253-007-1009-6

Bombardiere J. Espinoza-Solares T. Domaschko M. y Chatfield M. (2007) *Thermophilic anaerobic digester performance under different feed-loading frequency. Applied Biochemistry and Biotechnology*. 136-140, 765-776. DOI:10.1007/s12010-007-9096-5

Fernandez C. y Gonzalez R. (2014). *Estudio técnico-económico para la implementación de un biodigestor anaeróbico que reduzca lodos en planta de tratamiento de aguas servidas en Melipilla. Memoria de grado para título de Ingeniero Civil industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Chile.*

Kovacs K., Kovacs A., Moratic G., Bagi Z., Czanásdi G., Perei K., Balint B., Balogh J., Fulop A., Mészáros L., Toth A., Dávid R., Latinovics D., Vara A., Rakhely G. (2004) *Improvement of Bio Hydrogen production and intensification of Biogas formation. Reviews in Environmental Sciences and Bio Technology* N° 3. 321-330. DOI: 10.1007/s11157-004-7460-2

Lastella G., Testa C., Cornacchia G., Notornicola M., Voltasio F. & Kumar Sharma V. (2002) *Anaerobic digestion of semi-solid organic waste: biogás production and its purification. Energy Conversion and Management*. 3, 63-75. DOI: 10.1016/S0196-8904(01)00011-5

Parawira W., Murto M., Read J.S. & Mattiasson B. *Profile of hydrolases and biogas production during two-stage mesophilic anaerobic digestion of solid potato waste. Process Biotechnology* 40, 2945-2952. (2005) DOI: 10.1016/j.procbio.2005.01.010

Rosenkranz Fernandez, F. (2013). *Estudio del comportamiento de reactores anaeróbicos de tipo ASBR frente a compuestos de difícil degradación y/o efectos negativos. Tesis de grado de doctor para doctorado en bioquímica y doctorado en Ingeniería química y ambiental. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y Universidad de Santiago de Compostela.*

Weiland P. *Biogas production: current state and perspectives. Applied Microbiology and Biotechnology*. 85, 849-860. (2010) DOI: 10.1007/s00253-009-2246-7

Weiss A., Jérôme V., Freitag R. y Mayer H.K. *University of the resident microbiota in a thermophilic municipal biogas plant. Applied Microbiology and Biotechnology* 81, 163- 173. (2008) DOI: 10.1007/s00253-008-1717-6

## AUTORES:

K. Muñoz<sup>a</sup>, K.Kanzua<sup>a</sup>, B. Montedónico<sup>a</sup>, Bastián Díaz<sup>a</sup> y S.P. Cárdenas<sup>a</sup>.

<sup>a</sup>Escuela de Industrias, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Chile.

<sup>b</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Chile.

Corresponding author: scardenasm@ucentral.cl

## AGRADECIMIENTOS:

Este proyecto se pudo llevar a cabo gracias al financiamiento por el Concurso Interno de Investigación 2012 y el Concurso Interno de Investigación 2013, ambos de la dirección de Investigación de la Universidad Central de Chile.