

Diseño de un Reactor para el Tratamiento de Residuos de Frutas y Hortalizas

Dr. José Guadalupe Vian Pérez ^{a, b},
Dra. Alejandra Velasco Pérez ^b, Dr. Sergio Esteban Vígueras Carmona ^c



Acerca de los autores

^a Académico-Investigador de la Universidad Politécnica de Huatusco, Huatusco Veracruz.

^b Académico-Investigador Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Región Córdoba-Orizaba, Orizaba, Veracruz.

^c Académico-Investigador del Tecnológico Nacional de México/ Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Estado de México.

Resumen

En este trabajo se presenta una nueva configuración de reactor anaerobio para la producción de metano a partir de residuos de frutas y hortalizas. El reactor anaerobio de flujo ascendente empacado con lecho de lodos, se diseñó y evaluó en el Laboratorio de Tecnología Anaerobia del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec. Su diseño se fundamenta en la separación de las etapas del proceso de digestión anaerobia dentro de un mismo dispositivo. En una sección de estado sólido, se favorece la desintegración de los residuos para liberar partículas fácilmente biodegradables, las cuales son consumidas en otra sección, que consiste en un lecho de lodos, para producir

metano. Al evaluar su desempeño, la productividad de metano alcanzada fue de $3.6 \text{ L}_{\text{CH}_4}/\text{L}/\text{d}$, al aplicar una velocidad de carga orgánica de $10 \text{ g SV}/\text{L}/\text{d}$. Los resultados son comparables con los obtenidos con otros sistemas que tratan el mismo tipo de residuos.

Palabras clave: Reactor Anaerobio, Residuos de Frutas y Hortalizas, Producción de Metano.

Abstract

In this work, a new configuration of anaerobic reactor or methane production from fruit and vegetable waste is presented. The up-flow anaerobic sludge blanket solid-state reactor was designed and evaluated at the Anaerobic Technology Laboratory of the Technological Institute of Higher Studies of Ecatepec. Its design is based on the separation of the stages of the anaerobic digestion process within the same device. In a solid-state section, the disintegration of waste is favored to release easily biodegradable particles, which are consumed in another section, consisting of a sludge bed, to produce methane. When evaluating its performance, the methane productivity achieved was $3.6 \text{ L}_{\text{CH}_4}/\text{L}/\text{d}$, applying an organic loading rate of $10 \text{ g SV}/\text{L}/\text{d}$. The results are comparable to those obtained with other systems treating the same type of waste.

Keywords: Anaerobic Reactor; Fruit And Vegetable Waste; Methane Production.

Introducción

La digestión anaerobia (DA) es una alternativa interesante para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) ya que posibilita su valorización energética. Durante este proceso, diversos grupos de microorganismos degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno, lo que resulta en la producción de un biogás rico en metano. Este biogás puede ser aprovechado para la cogeneración de energía eléctrica o calorífica.

Por consiguiente, es importante que los biorreactores anaerobios sean diseñados y operados de manera óptima para garantizar una DA eficiente. Esto implica favorecer la remoción de sólidos y maximizar la producción de metano operando con tiempos de retención cortos, es decir, que los residuos permanezcan en el sistema el menor tiempo posible (Mata-Álvarez *et al.*, 2000).

En cada caso de digestión, la selección de la tecnología anaerobia a utilizar y el desarrollo de nuevas tecnologías, depende de las características de los residuos a ser tratados. De la FORSU, un porcentaje significativo corresponde a residuos de frutas y hortalizas (RFH), y durante su digestión surgen dos consideraciones importantes. En primer lugar, los



residuos presentan una estructura física compleja, lo que puede disminuir la velocidad global de reacción del proceso (Izumi *et al.*, 2010). Por el otro, tienen un alto contenido de carbohidratos fácilmente biodegradables (hasta 75%) (Edwiges *et al.*, 2020), lo que puede ocasionar problemas de estabilidad de los reactores, debido a la acumulación de intermediarios.

Atendiendo a las implicaciones de las características de los RFH sobre el proceso anaerobio, en el Laboratorio de Tecnología Anaerobia del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec se ha desarrollado el Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente Empacado con Lecho de Lodos (RAFAELL) para el tratamiento de RFH. Por lo tanto, el objetivo de este artículo es describir el diseño del reactor y los resultados obtenidos en términos de la eficiencia alcanzada.

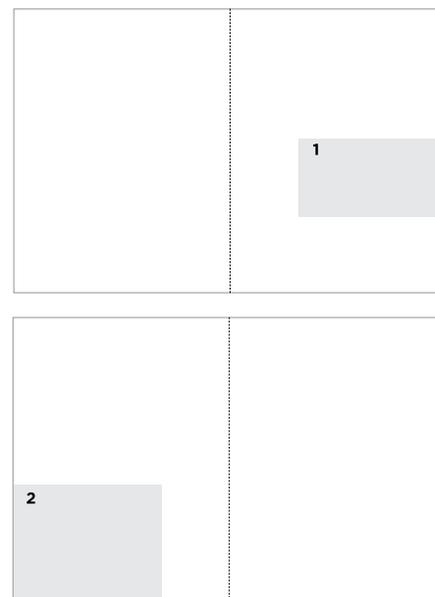
1. Digestión anaerobia de residuos de frutas y hortalizas

El proceso de DA de la materia orgánica comienza con la acción de enzimas liberadas por los microorganismos presentes en el medio, las cuales hidrolizan los carbohidratos, proteínas y lípidos del sustrato, liberando sus monómeros estructurales (azúcares, aminoácidos y ácidos grasos). Estos compuestos solubles son consumidos por bacterias acidogénicas, las cuales los metabolizan para producir ácidos grasos volátiles (AGV), como el ácido acético, propiónico, butírico y valérico. Posteriormente, los AGV son transformados en ácido acético por microorganismos acetogénicos. Durante esas etapas, también se liberan H_2 y CO_2 , entre otros gases. Finalmente, las arqueas metanogénicas producen metano mediante el consumo de ácido acético o a través de la reducción de CO_2 (Xu *et al.*, 2018).

Este proceso involucra diferentes consorcios microbianos que se diferencian por el sustrato que utilizan. Para mantener la estabilidad de los sistemas anaerobios, es fundamental que los microorganismos de una etapa consuman el sustrato a la misma velocidad que es producido en la etapa previa. De lo contrario, la acumulación de intermediarios puede afectar el desempeño de la DA. Uno de los problemas más relevantes en este sentido, es la inhibición de la etapa metanogénica por la acumulación de AGV (Bouallagui *et al.*, 2005). Debido a la acidificación del medio ($pH < 7$), los AGV difunden al interior de las arqueas metanogénicas, inhibiendo su función.

En los RFH los biopolímeros se encuentran embebidos, formando una matriz sólida. Durante la etapa hidrolítica, las enzimas deben adherirse a la superficie del sustrato; por lo tanto, cuanto mayor sea el tamaño de las partículas, más tiempo se requiere para su hidrólisis, lo que puede limitar la velocidad global del proceso de DA (Zhang y Banks, 2013). Sin embargo, debido al contenido de carbohidratos fácilmente biodegradables (56 - 75%), una vez que el sustrato se ha hidrolizado, es fácilmente metabolizado por los microorganismos acidogénicos, lo cual conlleva a la acumulación de AGV, que pueden inhibir la etapa metanogénica del proceso (Izumi *et al.*, 2010).

Ante estos problemas, se han implementado diversos pretratamientos de los residuos, como la disminución mecánica del tamaño de las partículas y estrategias para separar físicamente las etapas del proceso de DA. En estos sistemas, se utiliza un primer reactor, donde se establecen las condiciones óptimas para la hidrólisis-acidogénesis del sustrato (Montes-García *et al.*, 2019). El efluente acidificado es alimentado a un segundo reactor metanogénico, controlando el pH. Dicha estrategia garantiza un ambiente idóneo para las arqueas metanogénicas, sin embargo, la necesidad de contar



https://www.google.com/search/sca_esv=3c191617fa4b492a&rlz=1C1GIWA_enMX805MX805&q=Residuos+de+Frutas+y+Hortalizas&udm=2&fbs=AEQNmOCbCVgAZ5mWEJDg6aoPVcBgWizR0-0aFOH1Sb5tINhd7Qv31WAq-g3XdD7m281OKzE3

con dos unidades de reacción, conlleva un aumento en los costos para su implementación. Entonces, la meta de ingeniería que surge, es el diseño de reactores de una etapa que logren un rendimiento comparable a los sistemas de dos etapas tratando RFH.

2. Diseño del reactor

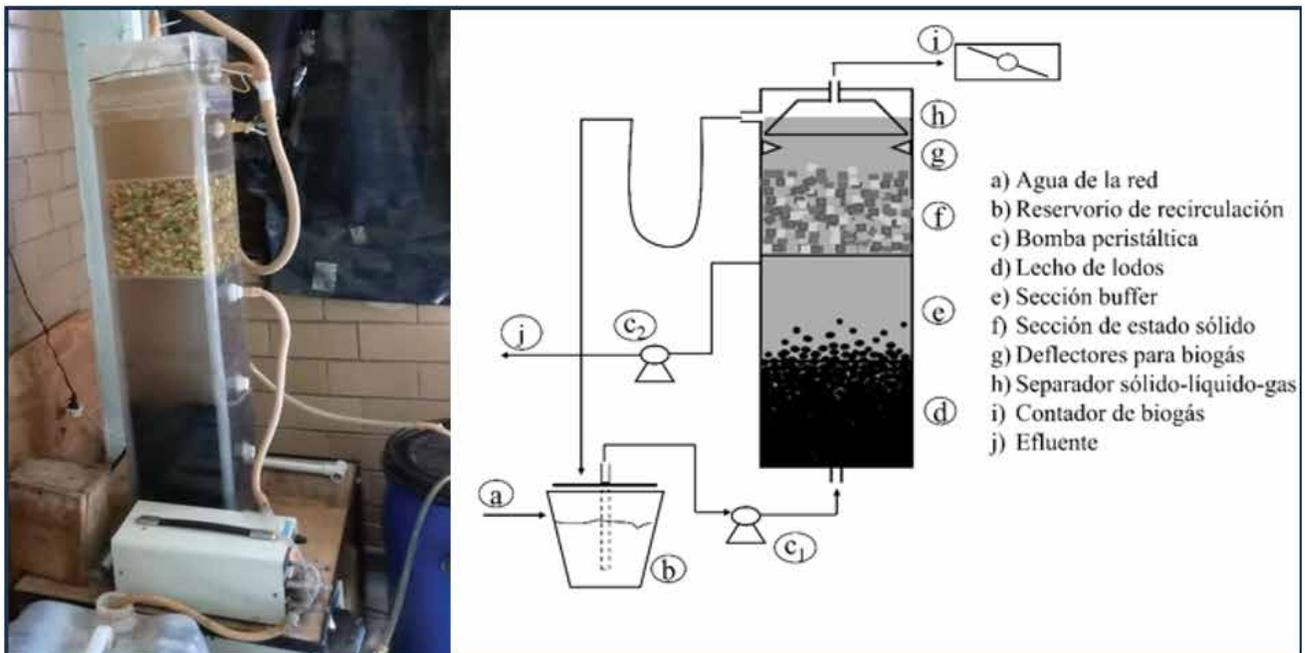
2.1 Configuración del reactor

Al analizar el problema de la DA de los RFH se propuso una configuración de reactor que permite la separación de las etapas del proceso anaerobio en un mismo dispositivo. El RAFAELL, ilustrado en la Figura 1, es un reactor tubular de acrílico que consta de cuatro zonas. En la primera sección se inocula lodo anaerobio, que por su densidad forma un lecho (Fig. 1[d]). La segunda sección (buffer, Fig. 1[e]) es útil para el transporte de materiales provenientes del lecho de lodos. En la tercera sección, se empaican los RFH (Fig. 1[f]) y, finalmente, la zona superior consiste de un separador sólido-líquido-gas. La zona del separador y del lecho se conecta a través de una recirculación, que pasa por un reservorio donde se controla la temperatura del medio (a 35 °C, régimen mesofílico) antes de ser bombeado hacia el lecho de lodos.

El líquido alimentado al reactor, asciende a través de las cuatro zonas. Al pasar sobre los RFH, los esfuerzos cortantes del agua provocan su desintegración, liberando partículas menores a 2.5 Qm. En esta sección también se generan AGV. Estos materiales son transportados hacia el lecho de lodo mediante una corriente de recirculación, donde son transformados en metano y CO₂ por los microorganismos presentes en el lodo. Al consumirse los AGV, el pH en esta sección aumenta a valores superiores a 7, dando lugar a un sistema buffer, que consiste en el equilibrio entre CO₂, H₂CO₃, HCO₃⁻ y CO₃²⁻. Esta alcalinidad asciende a las secciones superiores, donde se consume la acidez generada en la sección de empaque. El biogás generado es recuperado en el separador sólido-líquido-gas y transportado a un contador, donde se cuantifica el volumen producido.

Figura 1

Fotografía y esquema del RAFAELL (Vian, 2020).



2.2 Geometría del reactor

Para la construcción del reactor se utilizó acrílico, debido a su menor costo, en comparación con el acero y otros materiales, además de posibilitar la observación de los cambios físicos internos. En cuanto a la geometría, la rectangular resultó más económica que la cilíndrica. Otra consecuencia importante de emplear una base cuadrada, es que la altura del reactor es menor, si se compara con uno del mismo volumen, pero de base circular.

En 2013, durante la primera etapa del diseño del reactor, el volumen de trabajo fue de 24 L, con un área de sección transversal de 400 cm². El volumen asignado a las secciones de lecho y buffer fue de 8 L a cada una, y el resto para las otras secciones. Sobre la base del reactor y en los límites de la sección de estado sólido, se colocaron placas con orificios de 3 mm de diámetro equidistantes a 1 cm. Estas placas distribuyen el líquido para evitar la aparición de zonas estancadas en las esquinas del dispositivo.

Posteriormente, ante la necesidad de incrementar la cantidad de RFH alimentados al sistema, se asignaron 16 L a la sección de estado sólido, conservando el área de sección transversal. Con esta modificación (Figura 2), el volumen de trabajo del reactor incrementó a 35 L.

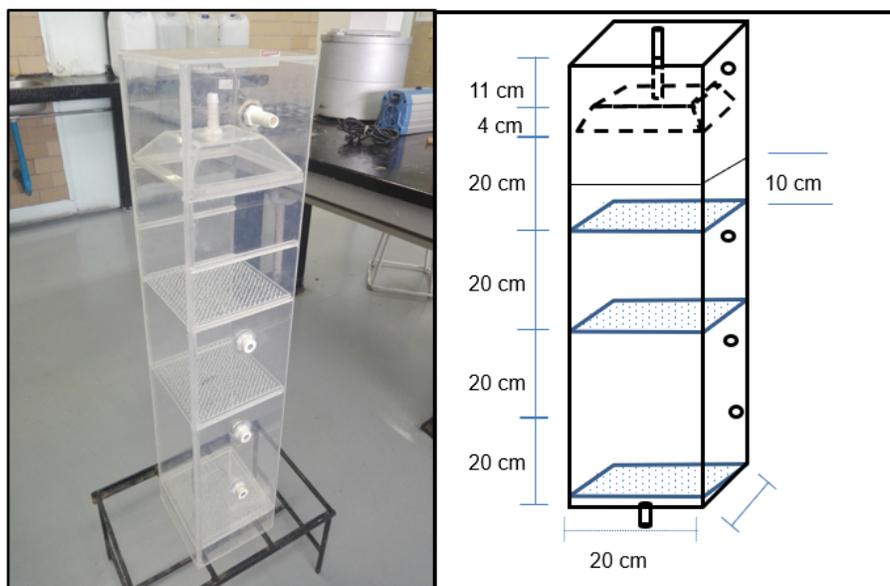


Figura 2

Geometría del RAFAELL.

2.3 Parámetros de diseño y operación del reactor

Los parámetros de diseño del reactor fueron la velocidad ascensional y el tiempo de retención hidráulica (TRH). Se estableció la velocidad ascensional del líquido que promoviera la desintegración de los RFH. Esto se realizó en una columna empacada con RFV sometida al flujo ascendente de agua residual, modificando la velocidad ascensional y evaluando la calidad del efluente (líquido a la salida de la columna) en cuanto a la concentración de sólidos y su tamaño de partícula. Se experimentó con cuatro velocidades ascendentes, que fueron 0.5, 1, 1.4 y 2 m/s. Considerando que la reducción del tamaño de partícula favorece su consumo, se seleccionó la velocidad de 1.4 m/s, ya que se produjo un efluente con partículas de menor diámetro. El 93% de las partículas liberadas tenían un tamaño inferior a 20 Qm.

Para determinar el TRH, es decir, el tiempo que el líquido debe permanecer dentro del sistema para una digestión eficiente, se analizaron ensayos de biodegradabilidad anaerobia. Estos ensayos consisten en la digestión de los RFH en viales de 120 mL utilizando lodo anaerobio como inóculo en un medio mineral. Durante los ensayos se registró la producción diaria de metano. Los resultados mostraron que el 88% del total de metano se generó en los primeros cinco días, con una disminución en la producción en los días siguientes. Por consiguiente, se identificó que un TRH de cinco días, era suficiente para producir la máxima cantidad de metano.

Debido a que los flujos volumétricos necesarios para obtener la velocidad ascensional y el TRH son diferentes, se utilizan dos bombas. La primera (Fig. 1[c₁]) alimenta el reactor con un flujo volumétrico de 56 L/h para alcanzar la velocidad ascensional. La segunda bomba (Fig. 1[c₂]) que controla el TRH, dirige un flujo volumétrico de 0.25 L/h desde la sección buffer hacia el exterior (Vian, 2014).

Respecto al análisis del rendimiento de los reactores, es importante considerar los sólidos volátiles (SV), los cuales corresponden a componentes orgánicos presentes en la materia. Al determinar la cantidad de SV en los RFH, se puede calcular cuánta materia orgánica se introduce y se degrada dentro del reactor.

Al inicio, se operó el reactor con una carga orgánica volumétrica (COV) de 0.66 g SV/L/d, es decir, el reactor fue empacado con una cantidad de RFH equivalente a introducir diariamente 0.66 g SV por cada litro de reactor. La COV se incrementó gradualmente hasta alcanzar un valor de 10 g SV/L/d. Para conocer el efecto de la COV sobre el desempeño del reactor, se midió el volumen de metano producido diariamente por unidad de volumen del reactor. Este último parámetro se denomina productividad metanogénica y se expresa como $L_{CH_4}/L/d$. Asimismo, se monitorearon otras variables, como el pH, la concentración de AGV y la concentración de sólidos en el efluente del reactor.

3. Desempeño del reactor

El proceso de DA de RFH se llevó a cabo de manera estable en el RAFAELL. La eficiencia de remoción de los sólidos volátiles fue de 67%, es decir, dicho porcentaje de la materia orgánica contenida en los RFH fue metabolizada por los microorganismos y transformada en biogás. Además, la productividad de metano fue proporcional a la COV, como puede apreciarse en la Figura 3.

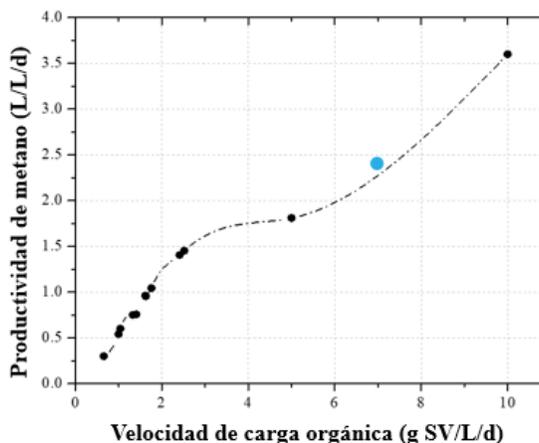


Figura 3

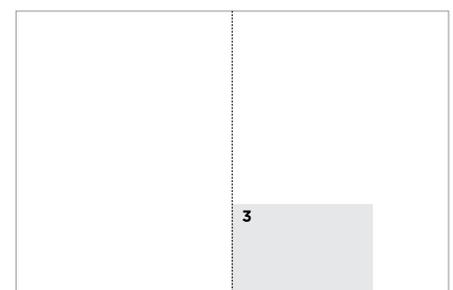
Desempeño del RAFAELL.
Productividad de metano en función
de la carga orgánica aplicada.

Lo más interesante, es que se aplicaron cargas mayores que las reportadas para sistemas de dos etapas, conservando estabilidad. Por ejemplo, en la Figura 1, el punto azul señala una productividad de $2.3 L_{CH_4}/L/d$ para una carga orgánica de $7 g SV/L/d$, que es la máxima carga de RFH que se ha aplicado a sistemas de dos etapas. Por su parte, con el RAFAELL se obtuvo una productividad de $3.6 L_{CH_4}/L/d$ para una carga orgánica de $10 g SV/L/d$. Al incrementar la carga, se observó un descenso en el pH dentro del reactor, como consecuencia de la producción de AGV, sin embargo, estos fueron consumidos eficientemente en el lecho de lodos y a los pocos días, el pH retornaba a valores de 7 o superiores (Vian *et al.*, 2020).

Conclusiones

En el Laboratorio de Tecnología Anaerobia del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, se diseñó una nueva configuración de reactor anaerobio para el tratamiento de la FORSU. El diseño del RAFAELL considera una sección de estado sólido, donde se promueve la desintegración de los RFH debido a los esfuerzos cortantes del líquido que asciende. Esta sección está separada de un lecho de lodos, donde se consumen eficientemente los sólidos (con tamaño de partícula $< 20 \mu m$). La separación de estas etapas dentro del mismo reactor posibilita el amortiguamiento de los cambios de pH. El reactor presentó buenas eficiencias de remoción de sólidos (67%) y soportó cargas orgánicas mayores ($10 g SV/L/d$) a las aplicadas a sistemas de dos etapas ($7 g SV/L/d$), que tratan el mismo tipo de residuos. La productividad de metano fue proporcional a la carga orgánica aplicada, alcanzando valores de $3.6 L_{CH_4}/L/d$.

El trabajo presentado comenzó en 2012, y ha contado con la participación de alumnos de servicio social y tesis. Sin duda, todavía hay aspectos que deben ser estudiados, por ejemplo, el cambio de escala o el aumento del tamaño de partícula de los residuos alimentados al sistema. No obstante, esto brinda la oportunidad para que los estudiantes aborden temas de investigación relacionados con este trabajo.



residuos-maravillas-transformacion-
desechos-cocina-suelo-rico-nutrientes-ia-
generativa_742252-15506

Referencias

- Bouallagui, H., Touhami, Y., Ben Cheikh, R., & Hamdi, M. (2005). "Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes". *Process Biochemistry*, 40(3-4), 989-995.
- Edwiges, T., Frare, L. M., Lima Alino, J. H., Triolo, J. M., Flotats, X., & Silva de Mendonça Costa, M. S. (2020). "Methane potential of fruit and vegetable waste: an evaluation of the semi-continuous anaerobic mono-digestion". *Environmental Technology*, 41(7), 921-930.
- Izumi, K., Okishio, Y. Ki, Nagao, N., Niwa, C., Yamamoto, S., & Toda, T. (2010). "Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste". *International Biodeterioration and Biodegradation*, 64(7), 601-608.
- Mata-Álvarez, J., Macé, S., & Llabrés, P. (2000). "Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives". *Bioresource Technology*, 74(1), 3-16.
- Montes-García, M. M., Viguera-Carmona, S. E., Pérez-Vargas, J., Zafra-Jiménez, G., Velasco-Pérez, A., & Chang-Solís, C. K. (2019). "Two-stage anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes". *Journal of Biotech Research*, 10, 29-37.
- Vian, J. (2020). Caracterización y modelado de un reactor anaerobio de flujo ascendente empacado con lecho de lodos [Tesis de doctorado]. Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco.
- Vian, J., Viguera-Carmona, S. E., Velasco-Pérez, A., & Puebla, H. (2020). "A Novel Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket Solid-State Reactor for the Treatment of Fruit and Vegetable Waste". *Environmental Engineering Science*, 37(5), 373-381.
- Vian, J. (2014). Producción de metano a partir de residuos sólidos urbanos orgánicos vegetales. [Tesis de maestría]. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana.
- Xu, F., Li, Y., Ge, X., Yang, L., & Li, Y. (2018). "Anaerobic digestion of food waste - Challenges and opportunities". *Bioresource Technology*, 247(July 2017), 1047-1058.
- Zhang, Y., & Banks, C. J. (2013). "Impact of different particle size distributions on anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste". *Waste Management*, 33(2), 297-307.

Fotografías

https://www.google.com/search/sca_esv=3c191617fa4b492a&rlz=1C1GIWA_enMX805MX805&q=Residuos+de+Frutas+y+Hortalizas&udm=2&fbs=AEQNm0CbCVgAZ5mWEJDg6aoPVcBgWizRO-0aFOH11Sb5tINhd7Qv31WAq-g3XdD7m281OKzE3

residuos-maravillas-transformacion-desechos-cocina-suelo-rico-nutrientes-ia-generativa_742252-15506