

The logo for Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM) features the letters 'UACM' in a bold, white, sans-serif font against a dark red background.

Universidad Autónoma  
de la Ciudad de México

*Nada humano me es ajeno*

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

**COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**PROGRAMA DE ENERGÍA**

**Calculadora para determinar la relación C/N para la  
Biodigestión Anaerobia de la fracción orgánica de  
los residuos sólidos urbanos del comedor, plantel  
San Lorenzo Tezonco de la Universidad Autónoma  
de la Ciudad de México**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE  
LICENCIATURA EN:

**INGENIERÍA EN SISTEMAS ENERGÉTICOS**

P R E S E N T A

**SHIRLA MICHELLE PANTOJA LÓPEZ**

DIRECTORA:

**DRA. MA. CLAUDIA ROLDÁN AHUMADA**

Ciudad de México, febrero de 2025.

## SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



## UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

### RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

### DERECHOS RESERVADOS<sup>©</sup>

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

**INTEGRACIÓN DEL JURADO:**

Presidente: Mrto. Raúl Amílcar Santos  
Secretario: Dra. Ma. Claudia Roldán Ahumada  
Vocal: Mrto. Juan Gilberto Salas Márquez  
1er. Suplente: Dr. Edgar Vicente

Lugar donde se realizó la carrera:

PLANTEL SAN LORENZO TEZONCO, UACM.

**DIRECTOR DE TESIS:**

---

Dra. Ma Claudia Roldán Ahumada  
Universidad Autónoma de la Ciudad de México

## **Agradecimientos y Dedicatorias**

Primero que nada, dedico este trabajo al esfuerzo que hizo mi mamá por haberme apoyado durante toda mi carrera escolar y mis abuelas por ser como segundas mamás. Le doy gracias a Dios, y a todas las personas que creen y están a mi lado en las buenas, malas y en las mejores etapas de mi vida. Creo firmemente que a todos nos llega nuestro momento a su tiempo y que Dios nos tiene una misión en el mundo.

Agradezco infinitamente al sistema de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México por haberme brindado la oportunidad de estudiar en este bello colegio, primero en plantel Casa Libertad y después en plantel San Lorenzo Tezonco, me concedió, además, la ocasión de viajar y presentar uno de mis artículos (con el apoyo del Mtro. Israel Eliú Hernández, el Mtro. Fernando Arrollo Cabañas, compañeros de clases Víctor Sánchez escalona y demás) para presentar en el XL Encuentro Nacional de la AMIDIQ, en Oaxaca, el cual contribuyó a mi formación.

Agradezco a todos mis profesores y profesoras, sin excepción, cada uno y una por su tiempo brindado en aula y fuera de ella, creo que todos tienen un nivel de profesionalismo fantástico, el cual, sigue sufragando para la formación de los alumnos, sin su sabiduría y experiencia jamás hubiera logrado mi trayectoria. Agradezco sobre todo a la Dra. Ma. Claudia Roldán Ahumada por seguirme el paso y apoyarme hasta el final. Estoy agradecida de igual forma al Dr. Carlos Chávez Baeza por aceptarme en el servicio social durante la pandemia y a todos los trabajadores del comedor universitario, administración y de intendencia que me auxiliaron con información, permisos y equipo para realizar este trabajo. De igual forma, reconozco a mis compañeros de clases de la universidad, a todos sin exclusión alguna, por permitirme ser parte de su tiempo, gracias por apoyarme en clases, por compartir su conocimiento y bonitos momentos.

Por último, sé que tal vez ellos no puedan ver o percibir este escrito, pero es de suma importancia decir gracias a mis perritos Kichi y Terion por ser apoyo emocional en todo momento y limpiar mis lágrimas.

# ÍNDICE

Resumen .....	1
1. Introducción .....	2
1.1 Situación Problemática .....	7
1.1 Hipótesis .....	9
1.2 Objetivos .....	10
1. Antecedentes .....	11
1.1 Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en el Mundo y el Impacto en el Ecosistema .....	11
1.2 Fracción Orgánica de los Residuos Urbanos (FORSU) en México .....	13
1.2.1 Problemática .....	14
1.3 Normatividad Ambiental Mexicana Aplicable .....	18
1.4 Proceso de Industrialización de la Biodigestión Anaerobia.....	19
1.4.1 Biodigestión Anaerobia .....	20
1.5 Biogás .....	24
1.6 Tipos de Biodigestores Anaeróbios .....	25
1.6.1 Parámetros de Operación de los biodigestores anaerobios .....	28
1.6.2 Relación C/N.....	29
1.6.3 pH.....	30
1.6.4 Temperatura, Humedad y Tiempo de Retención.....	32
1.7 Panorama General de las FORSU que se Originan dentro de las Universidades.....	35
1.7.1 Desechos Producidos por el Comedor Universitario del Plantel SLT .....	35
2. Metodología .....	37
2.1 Toma de Muestras de los FORSU del Comedor Universitario.....	37
2.1.1 Generación per Cápita según la norma NMX-AA-61-1985 .....	38
2.1.2 Clasificación de Tipo de Residuos Orgánicos Según la Norma NMX-AA- 22-1985 ....	40
2.1.3 Características Fisicoquímicas de la Materia Prima .....	41
2.2 Elaboración de la Calculadora de la Relación C/N Según las Fracciones Orgánicas de los Residuos Sólidos .....	44
3. Resultados y Discusión.....	44

<b>3.1 Relación C/N de la FORSU del Comedor Universitario .....</b>	<b>45</b>
<b>3.2 Propuesta de Tipo de Biodigestor de Acuerdo con los datos obtenidos.....</b>	<b>47</b>
<b>3.3 Posibles Usos del Biogás Generado.....</b>	<b>48</b>
<b>3.4 Propuesta de Buenas Prácticas Óptimas para la calidad de Biogás .....</b>	<b>49</b>
<b>3.5 Biofertilizante (BIOL).....</b>	<b>50</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>51</b>
<b>Trabajo Futuro.....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXO 1 .....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXO 2 .....</b>	<b>55</b>
<b>Contenido de Figuras .....</b>	<b>58</b>
<b>Contenido de Tablas.....</b>	<b>58</b>
<b>ABREVIATURAS.....</b>	<b>59</b>

## **Resumen**

Este estudio determinó la relación C/N de la fracción orgánica de los residuos sólidos provenientes del comedor del plantel San Lorenzo Tezonco de la UACM. El trabajo de recolección de los orgánicos, se llevó a cabo junto con el apoyo de alumnos que realizaban el servicio social de la LISE, en los meses de mayo, junio, agosto, septiembre, octubre y noviembre del año 2023, siguiendo las normas mexicanas: NMX-AA-15-1985, NMX-AA-22-1985 y NMX-AA-61-1985, para clasificar y determinar los residuos que se generan por persona. La calculadora que determinó la relación C/N, se realizó en el programa Excel siguiendo la metodología del Manual del Biogás por la FAO. Los resultados mostraron que, la relación C/N de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), producidos por el comedor universitario, según la lectura, son aptos para la biodigestión anaerobia para la producción de biogás. Se concluye que, es necesario implementar programas que promuevan el manejo de los residuos, asimismo, se propone el seguimiento de esta tesis para la propuesta de nuevos trabajos y la adaptación de tecnologías que promuevan la sostenibilidad de la Universidad.

**PALABRAS CLAVE:** Relación C/N, FORSU, biodigestor anaerobio, biogás.

## **Abstract**

This study determined the carbon-to-nitrogen (C/N) ratio of the organic fraction of solid waste from the cafeteria of the San Lorenzo Tezonco campus of the Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM). The work of collecting organic waste was made it for me with the support of students who were performing social service at LISE during of May, June, August, September, October and November 2023. The collection and classification followed Mexican standards NMX-AA-15-1985, NMX-AA-22-1985, and NMX-AA-61-1985 to assess the waste generated per person. An Excel-based calculator was developed, following the methodology outlined in the FAO Biogas Manual, to determine the C/N ratio. The results indicate that the C/N ratio of the organic fraction of urban solid waste (FORSU) from the university cafeteria is suitable for anaerobic digestion and biogas production. The study concludes that it is essential to implement waste management programs and recommends further research to promote new initiatives and technologies that support the university's sustainability efforts.

**KEYWORDS:** C/N ratio, FORSU, anaerobic biodigester, biogas.

## 1. Introducción

Si bien en el paradigma del mundo en donde vivimos, donde la materia no se crea ni se destruye y solo se transforma, se considera que los cuerpos están compuestos de una serie de cadenas que los unen por una fuerza constituida por reacciones químicas y que cuando rompen sus enlaces, de acuerdo con una fuerza externa, se crean nuevas cadenas que representan una nueva forma de energía (Vázquez Arteaga, Pérez León, Rojas Juárez, & Acelmo Ramírez, 2020). Dicho lo anterior, los sustratos de la Tierra son transformados en elementos de utilidad para los humanos, desde utensilios hasta comestibles. Por lo general, una vez terminado el ciclo de utilidad de la materia, se reciclan o se desechan al medio ambiente, desafortunadamente, con el crecimiento poblacional, dichos desperdicios acrecientan su masa y, por lo tanto, el espacio territorial para su almacenamiento disminuye. Algunos, de estos al fusionarse con otros generan toxinas que se introducen en las capas del subsuelo produciendo inconvenientes que contribuyen al cambio climático, esto quiere decir que, causan de alguna forma la escasez de agua y la aniquilación de la flora y fauna.

La mala gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en todo el mundo afecta drásticamente el entorno donde vivimos. Un gran problema que afecta a las grandes ciudades que se desarrollan lentamente. Sin embargo, los países más comprometidos de la Unión Europea, como Alemania, Bélgica, Austria, Suecia, Países Bajos y Dinamarca, se encuentran desarrollando planes de acción más consistentes con objetivo principal es dar por finalizado el ciclo de vida de un producto, esto se debe gracias a la implementación de políticas públicas que elevan la tasa de reutilización, reciclaje, compostaje o incineración (con recuperación energética) (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 2020). En un panorama general mundial, según el Banco Mundial, se percibe Estados Unidos y China son los países territoriales con mayor generación per cápita con 800 kg a 1100 kg anualmente, un dato que es perturbador habiendo millones de habitantes en el mundo.

Aunado con la información anterior, México no se escapa de la ola de monstruosidad, en los informes del INEGI se revela que la Ciudad de México tiene una población de alrededor de 9,209,944 residentes para el 2020 con una tasa de crecimiento del 0.4, con una cantidad enorme de población, las tasas de residuos sólidos urbanos per cápita, generan 1.071 kg por día, esto equivale aproximadamente a 400 kg por año de residuos sólidos per cápita. De acuerdo con la SEDEMA 2021, la Alcaldía Iztapalapa, es el municipio con mayor generación de FORSU de la Ciudad de México con un alcance un promedio de 2149 toneladas diarias de estos desechos. Dato que es increíblemente alarmante ya que, la gran mayoría de los habitantes no tiene la información arraigada sobre la separación y reciclaje de los residuos (Secretaría del Medio Ambiente, 2021)

Otras características de la Ciudad de México, además de la cantidad enorme de habitantes, comprende que a los habitantes no se les brinda la información necesaria por parte de los medios de comunicación internos, mayoritariamente los compuestos a degradación más rápidos se encuentran los orgánicos que de acuerdo con El Programa de Gestión Integral de Residuos para la Ciudad de México, informa que un tercio de los alimentos que se producen en el mundo se desecha, esto quiere decir que ocurre en las diferentes etapas hasta llegar al consumidor (producción, almacenamiento, transporte, distribución y consumo). Con la información anterior se tiene que al menos en la Ciudad de México, la composición de los residuos sólidos urbanos muestra que los residuos orgánicos contribuyen con el 46.8% (Figura 1) de los desechos con datos publicados desde el 2010 hasta el 2021. Luego se considera que el crecimiento de una población subdesarrollada, como lo es México, provoca un problema que genera la contribución de la contaminación y el aumento del calentamiento global. A partir de casos similares, los países que cuentan con sistemas más desarrollados se interesan e integran soluciones para combatir el cambio climático; lo que se hace es un llamado a la lucha para la supervivencia del planeta por medio de una serie de acuerdos, en los que se destaca el impedimento del aumento de la temperatura del planeta por arriba de lo 1.5°C.

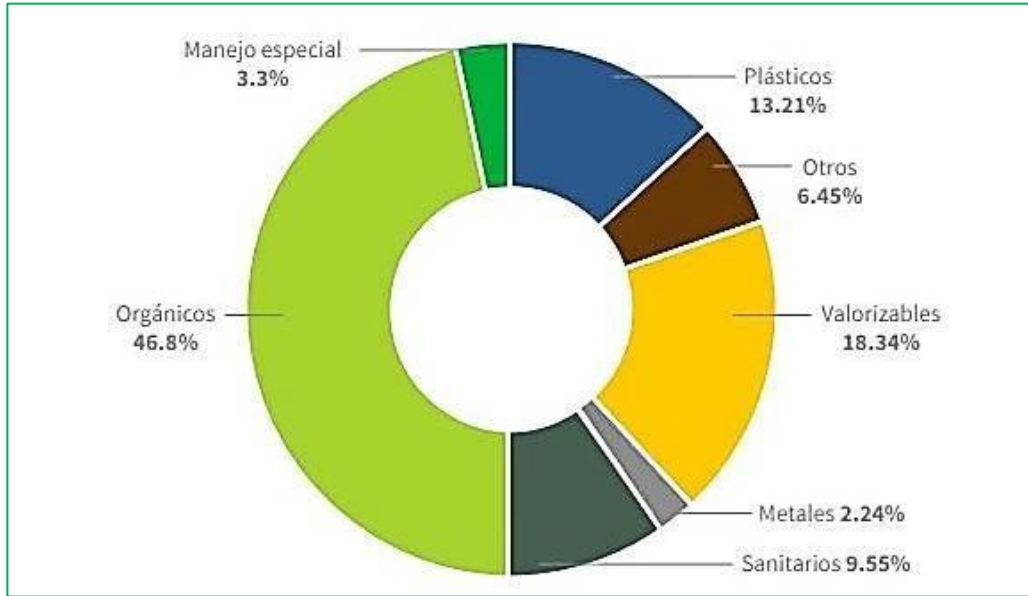


Figura 1. Clasificación de los residuos Sólidos en México 2010-2021: Fuente: (*Secretaría del Medio Ambiente, 2021*).

Por otro lado, el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2022-2024, establece un contenido general que amplía una gama de mantenimiento controlado para el manejo de los residuos sólidos, tal es el caso de promover la infraestructura y equipamiento para la prevención y gestión separada de los residuos orgánicos: Compostaje y Biodigestión. Visto anteriormente, la inducción por combatir el acrecentamiento de estas partículas, empujó a que algunos sectores tomaran cartas en el asunto y pusieran en marcha planes de contingencia que afectan beneficiosamente al cuidado del medio ambiente y en consecuencia a la salud humana, tal es el caso de la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente publicada el 28 de enero de 1988, la cual establece garantizar un presupuesto mínimo para la conservación y restauración de un equilibrio ecológico, así como garantizar la protección al ambiente en el territorio Nacional con motivo de disminuir los gases de efecto invernadero y la calidad del suelo y agua. Desafortunadamente, el gobierno en general no cuenta con la planificación sofisticada para el cumplimiento de estas en un enfoque urbano, principalmente.

La separación de los RSU es un indicador que presenta una característica importante, ya que, al no haber una separación adecuada dentro de los varios sectores industriales y gubernamentales; el aprovechamiento de los residuos se vuelve más difícil y en consiguiente los tiraderos comunitarios que además de no tener regularización, incrementan su el volumen cada día provocando la liberación de grandes volúmenes de gases y contaminantes. Según la COFEPRIS, entre los más destacados se encuentran, los contaminantes biológicos (material vivo o en descomposición), contaminantes criterio (O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, partículas de suspensión y plomo) y contaminantes tóxicos (partículas en el aire en concentraciones bajas, pero altamente letales. Encarecidamente, por no contar con personajes en el poder que haga valer las leyes para un equilibrio ecológico, los residuos orgánicos en descomposición junto con plásticos, embalajes, envases, metales, detergentes etc., se mezclan con la materia orgánica donde se libera extravagantes cantidades de gases y lixiviados que podrían traer consecuencias un poco sin exagerar catastróficas para la humanidad.

Para explicar más bien lo antes escrito, un relleno sanitario es un confinamiento para la disposición final de los residuos sólidos diseñado con el único propósito de retener, compactar y cubrir con capas de suelo para no causar riesgo a la salud y amortización al medio ambiente, sin embargo, podrían descubrirse miles de tiraderos a cielo abierto, clandestinos (Figura 2), que son excavados en las subcapas del suelo donde arrojan los empaques de basura sin ningún tipo de protección por alguna membrana de retención, regulada, generando cantidades inimaginables de lixiviados que después afectan a los mantos freáticos y la liberación de gases como el metano que después se distribuye en el aire (López Ramírez , y otros, 2023).

De acuerdo con un artículo publicado en la revista Scielo el metano, en un lapso de 100 años, tiene un potencial de calentamiento global de 21 veces mayor la Dióxido de Carbono, este contribuye con alrededor del 20% como gas de efecto invernadero dominante en el calentamiento de la atmósfera. La materia orgánica en descomposición anaerobia conlleva a una etapa de óxido-reducción en donde al estar en contacto con humedad se forman microorganismos y bacterias que

se alimentan de glucosa y promueven a la etapa de metanogénesis (Corrales MSc, Antolinez Romero, Bohórquez Macías, & Corredor Vargas, 2015).



Figura 2. Tiradero de RSU a cielo abierto: Fuente: (Rivera, 2019)

Una de las particularidades más interesantes en este trabajo es la urgencia de poder ayudar, aunque sea con un granito de arena en brindar información a lo que se refiere a la incorporación de tecnologías que faciliten el buen manejo de los residuos sólidos urbanos, principalmente divulgando información de lo que se puede hacer con la FORSU, de un modo que puedan aprovecharse para la adquisición de biogás y ser utilizado como una fuente energética, así como el aprovechamiento del biofertilizante como abono.

## 1.1 Situación Problemática

De acuerdo con (ECOPUMA) el diseño del Sistema de Separación de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) establece que, la separación de los residuos debe ser clasificados conforme su origen, para luego, los residuos divididos como “otros” puedan ser dirigidos directo a los rellenos sanitarios en su porcentaje total.

Sin embargo, la proposición referida por la UNAM y con la implementación del proyecto Manejo Integral de los Residuos Sólidos para el Plantel San Lorenzo Tezonco (Fuentes Ayala, 2020), existe hasta el momento la desorientación escolar en lo que se refiere al manejo integral de los residuos. Se considera que, es un reto intrincado ya que la disposición final de todos los residuos generados por el Plantel San Lorenzo Tezonco de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México termina revuelta (Figura 3) en el mismo camión de la basura y no se aprovecha ninguna parcialidad de los RSU dentro de la casa de estudios, como medio sustentable, por lo que contradice a la UNAM. Por esta razón y otras más, es importante seguir con la proposición de nuevos métodos que ayuden a visualizar nuevos proyectos y ponerlos en marcha.



Figura 3. Disposición de los Residuos Sólidos del plantel San Lorenzo Tezonco UACM: Fuente: (Propia, 2023)

El análisis mostrado, conlleva a la propuesta del aprovechamiento de las Fracciones Orgánicas de los Residuos Sólidos Urbanos de la UACM del comedor universitario, ya que tiene como ventaja para el aprovechamiento de ellos en virtud de que, el personal que se encarga de cocina separa los orgánicos de los inorgánicos, en su totalidad. Por eso, se presenta una propuesta a la solución de los FORSU generados por el plantel SLT que podría, en un futuro, contribuir a la generación de energía con Biogás por medio de la Biodigestión Anaerobia y la minoración de residuos de la disposición final a los tiraderos clandestinos sanitarios, así como la reducción de los gases de efecto invernadero, esto justifica que, esta forma de almacenamiento orgánico se controla de manera aislada y evita la biodegradabilidad al aire libre.

Con la recolección de los RSU de materia orgánica del comedor universitario, se propone el conteo diario de la FORSU, de acuerdo con la normatividad mexicana, en los siguientes seis meses hábiles, luego, se procesan los resultados del pesaje y se caracterizan los macronutrientes para conocer el porcentaje de carbono y nitrógeno con una calculadora en Excel de acuerdo con el Manual del Biogás (Vernero Moreno, 2011) y así conocer la relación C/N, un factor importante que influye al proceso de biogás. Con los datos obtenidos, se propone el tipo de biodigestor, para algún proyecto dentro del plantel San Lorenzo Tezonco, así como las posibles aplicaciones del Biogás producido por el mismo.

La materia orgánica debe cumplir la relación de C/N establecida de entre 20:1 y 30:1, de lo contrario, la FORSU no puede ser apta para el proceso de metanogénesis. De otro modo, se considera que es posible convertir la materia orgánica a un proceso de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Zupancic & Grilic, 2012)

## 1.1 Hipótesis

Con base a la información general que se aprecia en los capítulos anteriores, se observa que la principal urgencia ambiental en el mundo es el manejo integral de los residuos. No basta únicamente en esperar que los gobiernos pongan en marcha planes para acabar con el crecimiento incontrolado de residuos, sino que se formen grupos de comunidades, ya sea institucionales o privados, que fomenten al manejo integral y control de los residuos para evitar un colapso en la humanidad. Con este trabajo se prevé que en un futuro se formen proyectos de ingeniería dentro de la universidad sumamente importantes para el desarrollo del país. Esto conformado por el apoyo de estudiantes y comunidad universitaria en general; un modelo capaz de reforzar y mantener los proyectos que se han propuesto en cuanto al manejo integral de los desechos sólidos y a su vez fomentar la educación de los estudiantes para que propongan más modelos.

En este trabajo, por lo tanto, se integra un modelo que calcula la relación de C/N de la mezcla heterogénea y homogénea de los desechos orgánicos por el plantel universitario San Lorenzo Tezonco, estos se integran principalmente de los residuos orgánicos con más peso como es la cáscara de sandía, la cáscara de melón, papaya, lechuga y la mezcla homogénea de todos los demás ingredientes, una vez hecho el procedimiento, de acuerdo con las normas que se mencionan anteriormente, en los meses de mayo a noviembre, se propone la planificación de un biodigestor anaerobio el cual debe cumplir ciertas características de acuerdo con agentes geofísicos descritos y el tipo de restos orgánicos a biodegradar.

Por lo tanto, si las FORSU obtienen una relación C/N adecuada que determina los valores ideales para la producción de metano, por la calculadora en Excel, es probable que con una relación mayor o igual a 20/1 y menor o igual a 30/1 de acuerdo con Zupancic & Grilic, (2012), es posible la implementación de un biodigestor anaerobio.

## 1.2 Objetivos

### *Objetivo General*

Elaborar una calculadora que posibilite la determinación de la relación C/N de las fracciones orgánicas de los residuos sólidos urbanos producidos por el comedor para la propuesta de un Biodigestor Anaerobio en el Plantel San Lorenzo Tezonco de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

### *Objetivos Específicos*

- Identificar los residuos sólidos urbanos que se producen en el comedor escolar del plantel SLT.
- Aplicar la norma NMX-AA-15-1985, NMX-AA-22-1985 y NMX-AA-61-1985 para clasificar y determinar los residuos que se generan por persona.
- Elaborar en el programa Excel una calculadora para determinar la relación C/N.
- Calcular la relación C/N según cada una de las FORSU.
- Proponer el tipo de biodigestor adecuado para las FORSU del comedor San Lorenzo Tezonco.

## **1. Antecedentes**

A continuación, se presenta el panorama general de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), anteriormente se menciona la principal problemática que enfrenta la casa de estudios de San Lorenzo Tezonco y se obtiene la conclusión de que la problemática es provocada mediante las autoridades de alto mando como lo es la alcaldía Iztapalapa; No aplican la normatividad precedente. La problemática del mal manejo de los residuos sólidos urbanos en México ha sido prescindible como tema de estudio por décadas, sin embargo, los diferentes factores que afectan a la aplicación de políticas concisas varían en lo socioeconómico, cultural y educativo.

### **1.1 Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en el Mundo y el Impacto en el Ecosistema**

A principio de la historia de la humanidad, los RSU no presentaban un dato alarmante debido a la baja tasa de población a nivel mundial, sin en cambio, conforme a la revolución industrial y crecimiento poblacional al siglo XX, se vuelve un dato curioso. La desinformación, principalmente, era limitada, no era de suma importancia la cantidad de residuos generados y los métodos de disposición, más, sin embargo, se enfocaban en la eliminación rápida y sencilla sin considerar el impacto ambiental. Luego, a mediado del siglo XX, con la creación de organismos gubernamentales, como la Organización de las Naciones Unidas, se percata del choque de la salud ambiental (suelo, agua y aire) (Martínez Abreu, Iglesias Durruthy, Pérez Martínez, Curbeira Hernández, & Sánchez Barrera, 2014). En pleno siglo XXI, con el conocimiento tecnológico al desborde, ha transformado la forma de optimización de los RSU; La inteligencia artificial, el internet de las cosas (IoT) y el análisis de datos que han acrecentado soluciones más eficientes y sostenibles que faciliten la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU) en el mundo.

Los principales líderes en avances tecnológicos para la GIRSU, son destacados por sus estrategias innovadoras y resultados sobresalientes, países como Alemania, que apuntan a la economía circular, Suecia por sus tasas de reciclaje muy altas y su enfoque a la valorización energética de

los residuos no reciclables, Países Bajos donde tienen desarrollado la gestión de residuos altamente eficientes, con un gran número de participación ciudadana para la prevención de residuos, en Japón, donde los sistemas de reciclaje y separación son forzosamente aplicados, además tienen la mejor tecnología para el tratamiento de residuos. En Norte América se implementan programas de reciclaje y metas para la reducción de residuos. Las políticas sólidas, la participación ciudadana, inversión en infraestructura e innovación tecnológica hacen que estos países destaquen en el buen manejo de los RSU (United Nations Environment Programme, 2024).

El impacto al ecosistema que ha experimentado debido a las buenas prácticas de los RSU indica que ha habido una menor contaminación al suelo, en la reducción de traslado de residuos al vertedero, lo cual reduce la liberación de lixiviados al subterráneo, existe menor contaminación del aire, esto quiere decir que, tienen menor tasa de incineración de basura y le tratamiento de desechos orgánicos, para la generación de fuente de energía, reducción en la contaminación al agua, al haber un manejo controlado y protección a ecosistema acuático. Además, se conservan os hábitats naturales, disminución de la extracción de recursos naturales y sobre todo la mitigación al cambio climático, como emisiones de GEI (principalmente el metano). Luego, al haber una mejor calidad del ecosistema, trasciende a la calidad de vida humana la cual goza de aire y agua limpios, así como la reducción de enfermedades.

La implementación de programas de educación ambiental, contribuyen a ciudades más limpias y saludables, haciendo disfrutar a los ciudadanos y empujándolos a que se sigan fomentando las buenas prácticas para el Manejo Integral de los Residuos Sólidos Urbanos.

Desafortunadamente, no todos los países del mundo consideran que la principal solución a la calidad de vida de los ciudadanos esté en la forzosa puesta en marcha de políticas para salvaguardar al ecosistema y fomentar el desarrollo sostenible.

## 1.2 Fracción Orgánica de los Residuos Urbanos (FORSU) en México

El tema del Manejo Integral Residuos Sólidos Urbanos se vuelve cada vez más importante para los países subdesarrollados porque ya no se haya qué hacer con la producción de tantas toneladas de basura diarias. En el caso de las FORSU, compuestos principalmente por restos de alimentos y materia vegetal, representan una porción considerable en Centro América y el Caribe (Figura 4), lo que abre una brecha de oportunidad para su aprovechamiento. En México, la gestión de la FORSU se encuentra en estado de desarrollo intermitente, esto quiere decir que, si bien existen iniciativas y normas al respecto, la implementación efectiva y la participación ciudadana aún representan desafíos, principalmente a nivel estatal y municipal, donde las políticas y prácticas varían considerablemente (Del Carmen Niño, y otros, 2020)

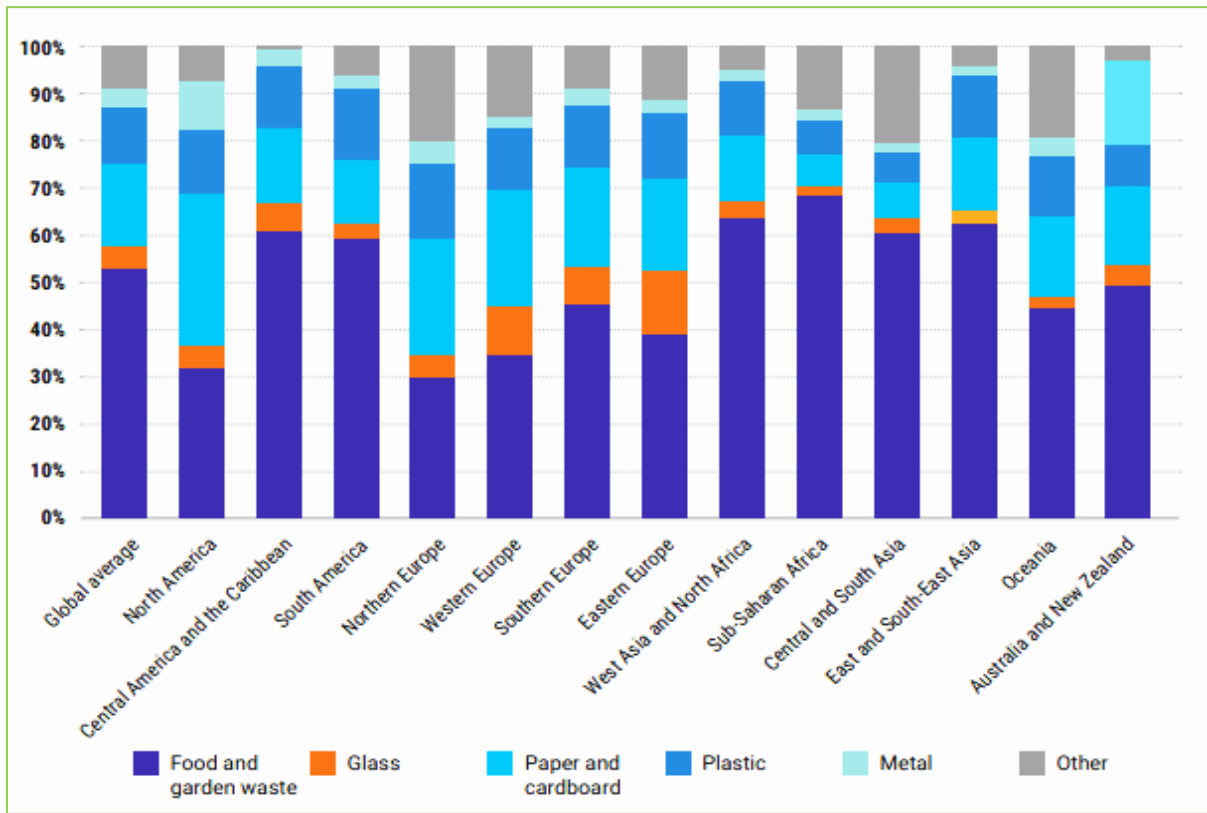


Figura 4. Promedio mundial y desglose regional de la composición de los residuos sólidos municipales:  
 Fuente: (United Nations Environment Programme, 2024). Nota: “Other” Incluye artículos como textiles, madera, caucho, cuero y productos de higiene personal y del hogar

### ***1.2.1 Problemática***

Existe un gran incumplimiento dentro de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, plantel San Lorenzo Tezonco, debido al mal manejo de los RSU. Se señala que, dentro de lo más urgente por resolver, es el seguimiento en la organización administrativa que tiene la universidad en cuanto al Manejo de los Residuos Sólidos Urbanos (MIRSU).

A pesar del lanzamiento del proyecto Manejo Integral de los Residuos Sólidos para el plantel San Lorenzo Tezonco, en el 2021, por parte de alumnos y docentes, con la puesta de contenedores (Figura 5) en las diferentes islas del plantel, la estación de transferencia para la disposición final temporal y grandes contenedores para la colocación de los residuos separados (Figura 6), presenta para el futuro un reto interesante.



Figura 5. Contenedores del plantel SLT: Fuente: (Coordinación San Lorenzo Tezonco, 2021)

Un reto que, la comunidad universitaria afronta al no contar con la información y cultura necesaria sobre la separación de residuos sólidos, así tanto el personal que se encarga de recolectar dichos residuos no ejerce un entrenamiento por parte de las autoridades universitarias en cuanto al manejo adecuado de la disposición final de los RSU en la estación de transferencia (Figura 7).



Figura 6. Estación de transferencia en el Plantel San Lorenzo Tezonco, UACM. Fuente: (*Coordinación San Lorenzo Tezonco, 2021*)

Desafortunadamente, estos residuos mezclados, causan graves problemas a la salud, al medio ambiente y a la vista estética, ya que, a la falta de la participación de recolección continua por parte de las autoridades de la Alcaldía Iztapalapa, las FORSU, atraen a un gran número de plagas, así como, la liberación lixiviados y la liberación de mal olor. Esto quiere decir que, el servicio de recolección de estos residuos se encuentra deficiente y elementos de las autoridades de la Alcaldía violan la Ley Federal de Residuos Sólidos del Distrito Federal (LRSDF), en su artículo 33 Bis, de la eficiencia de recolección de orgánicos (Procuraduría Ambiental y el Ordenamiento Territorial, 2003).

No obstante, en la Fracción II del artículo 10 y artículo 3 de la (Gaceta Oficial del Distrito Federal , 2019), establece el manejo integral de residuos con la recolección selectiva, por lo que, las alcaldías deberían contar con diferentes tipos de vehículos para los diferentes RSU.

Según el Informe del Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México 2021, se conocen, hasta ese momento, 2731 camiones de entidad gubernamental, de lo contrario, existe la recolección de vehículos que no están identificados. Además, informa que, no se tiene dato alguno de los

camiones identificaos en la alcaldía Iztapalapa, por lo que es sumamente inquietante (SEDEMA, 2021).



Figura 7. Estación de transferencia Mayo del 2023, mezcla de RSU. Fuente: (propia.2023).

**1.2.1.1 Impactos Ambientales.** Los impactos ambientales, consecuencia de la mala gestión de los residuos (United Nations Environment Programme, 2024) incluyen:

- En general la mala gestión de los residuos sólidos urbanos comprende consecuencias mortíferas, tanto humanas como en los recursos naturales, como: contaminación del suelo y agua, los residuos, especialmente los tóxicos, se filtran en el suelo afectando a la flora y fauna, la contaminación de aire, cuando ocurren incendios provocados de los residuos, a cielo abierto, provoca la liberación de gases tóxicos afectando a la capa de ozono.
- Pérdida de biodiversidad, las toxinas alteran los ecosistemas naturales destruyendo hábitats que ponen en peligros animales y vegetales.

- Además, el consumo excesivo que se presenta contribuye a escases de recursos naturales no renovables.
- La descomposición de los orgánicos generalmente en descomposición con los inorgánicos afecta drásticamente al ecosistema siendo el suelo, agua y aire los más afectados. Esto quiere decir que, la composición de materia orgánica y la materia que ha pasado por un proceso como lo es el plástico, cartón, detergentes, metales, etc. Pueden provocar reacciones químicas sumamente contaminantes para el suelo, agua y compuestos volátiles que se va a la atmósfera y quedan estancados.
- Atracción de plagas, aves y roedores que buscan alimento y al estar contaminados los restos orgánicos con demás toxinas, ya sea papel higiénico, residuos peligrosos como jeringas, un sinfín de artefactos con sangre pueden enfermar y afectar a los de su especie.
- **2.2.1.2 Riesgos a la Salud.** Los residuos sólidos urbanos representan una grave amenaza para la salud humana. La gestión inadecuada puede presentar un enorme problema como la proliferación de enfermedades por su propagación de los insectos, roedores y aves, así como la exposición a patógenos a través del contacto directo o la inhalación de partículas contaminadas. También, como es el caso de la quema de residuos a cielo abierto, la liberación de toxinas que dañan al sistema respiratorio. Como consecuencia, entre 400,000 y un millón de personas, mueren cada año a consecuencia de enfermedades relacionadas con la mala gestión de los residuos, incluye diarrea, malaria, enfermedades cardiacos y cáncer. Los lixiviados injertos en los mantos acuíferos contaminan el agua dulce con toxinas, la quema a cielo abierto produce gases se quedan atrapados en la atmósfera y son transportados hasta largas distancias para ser respirados por los humanos (United Nations Environment Programme, 2024).

### 1.3 Normatividad Ambiental Mexicana Aplicable

Se toma como referencia, para este trabajo, las siguientes normas ambientales emitidas por el gobierno de la Ciudad de México.

- NADF-024-AMBT-2013

Esta norma se toma como referencia, principalmente, porque es con la que parte la separación de los RSU en México. Por un lado, se tiene la separación primaria, donde se clasifican los inorgánicos de los inorgánicos, después la separación primaria avanzada que es donde se distinguen los residuos orgánicos aprovechables (Tabla 1), los inorgánicos; con potencial de reciclaje, de aprovechamiento limitado y los residuos especiales, voluminosos y peligrosos.

**Tabla 1.**

*Residuos Biodegradables susceptibles de ser aprovechado.*

<i>Color: Verde</i> <i>Pantone 360 C o 364</i> <i>RAL F-9/S2</i>	
<b>Materiales</b>	<b>Aprovechamientos</b>
<b><i>Residuos de Jardinería:</i></b>	<b><i>Producción de:</i></b>
<i>Flores, pasto, hojarasca, ramas</i>	Acolchado (Mulch)
<b><i>Residuos de alimentos:</i></b>	Alimento para animales
<i>Restos de verduras, hortalizas y frutas</i>	Biogás
<i>Cascarón de huevo</i>	Biofertilizantes
<i>Restos de café y té</i>	Bocashi
<i>Pan</i>	Composta
<i>Tortillas</i>	Lombricomposta
<i>Productos lácteos (sin recipiente)</i>	Fertilizante orgánico líquido
<i>Huesos</i>	Jabones
<i>Bioplásticos</i>	Bio-combustibles
<i>Aceite comestible usado</i>	Digestato

**Fuente:** (SEDEMA, 2015)

- NMX-AA-15-1985

Esta norma define el método del cuarteo para los residuos sólidos urbanos. Inicialmente muestra las medidas de protección mencionadas en la norma NMX-AA-22-1985, así como el número de personas tres que son las mínimas para realizar el muestreo. Las muestras se realizan bajo techo, en cemento. Se procede con el pesaje de los residuos heterogéneos y por último el residuo homogéneo. El informe del campo descrito en la norma se menciona en el Anexo 1 (SEMARNAT).

- NMX-AA-22-1985

Esta norma establece la clasificación de residuos sólidos urbanos, sin embargo, se contempla para las fracciones orgánicas de los residuos sólidos urbanos donde se emplean los equipos de protección para realizar las muestras: balanza, mascarillas, overoles, escoba, guantes, bolsas de polietileno. Luego, con la información obtenida, después de la cuantificación, los datos se transcriben a una hoja de registro del campo descrito en el subtema 4.1.2 de este trabajo (SEMARNAT)

- NMX-AA-61-1985

Esta norma se enfoca en la determinación de la generación de residuos sólidos municipales. Establece un método para calcular la cantidad de basura que produce una comunidad o ciudad. La norma es importante ya que con la información determinada se planifica y gestiona más fácilmente los residuos, desde su recolección hasta su disposición final. La norma es aplicada en el subcapítulo 4.1.1 (Centro de Calidad Ambiental, 1992).

## **1.4 Proceso de Industrialización de la Biodigestión Anaerobia**

La industrialización es un proceso por el cual se obtiene un bien por medio de la tecnología. La industrialización de la biodigestión anaerobia implica una serie de transformaciones clave para la transición hacia una economía circular, en algunos países el proceso de industrialización se

encuentra más desarrollado como en Brasil y la India. Los beneficios que incluyen el aprovechamiento de los recursos orgánicos, el proceso genera biogás, un medio sostenible para producir electricidad y calor, así como biofertilizantes. La gestión de residuos orgánicos permite tratar grandes cantidades materia orgánica de forma empática reduciendo significativamente los gases de efecto invernadero y contaminación y por último la reducción de emisiones de metano a la atmósfera (Molina Ruiz, y otros, 2018). Además, la industrialización de la biodigestión anaerobia consiste en la mutación de la ciencia para manipular los residuos a gran escala y tener procesos más eficientes, estos incluyen:

- Diseño y construcción de biodigestores que tratan grandes volúmenes de materia orgánica, como los biodigestores de cúpula fija, de membrana, continuos, etc., cada uno con sus ventajas y desventajas.
- Optimización de procesos: Se inquieren las condiciones óptimas para que los microorganismos trabajen de manera eficiente con apoyo de un control de los parámetros del proceso, buscando la temperatura, pH y tiempo de retención precisos.
- Tratamiento de los residuos: se fomenta el desarrollo de tecnologías para pretratar los residuos orgánicos (trituración, homogenización) y post-tratar el digestato para obtener un biofertilizante de calidad.
- Captura y aprovechamiento de biogás, donde se instalan sistemas para capturar el biogás y purificarlo para la obtención de biometano que puede ser inyectado a la red de gas natural. Asimismo, puede integrarse a otras tecnologías como la cogeneración para aumentar la eficiencia energética y reducir los costos (Santos García, 2021).

### ***1.4.1 Biodigestión Anaerobia***

Se le llama biodigestión anaerobia a la descomposición de desechos orgánicos en ausencia de oxígeno, de acuerdo con el Manual de Autoenseñanza Programada por el FIRCO, el fenómeno es

conocido durante muchos años, exactamente en el año 1776 por Alejandro Volta, y cuenta que la materia orgánica enterrada, en descomposición, libera metano (la descomposición de vegetales en el fondo de lagunas), así como en 1905, en Inglaterra Humphrey Davy descubrió que se podía obtener metano y dióxido de carbono a partir de la fermentación de estiércol vacuno en un ambiente húmedo. Consecutivamente, trabajos de investigación por Luis Pasteur, en 1861, intuyo que el biogás estaba asociado a bacterias anaerobias, junto a su alumno Ulysse Gayon, proponen además que el biogás podría ser utilizado para la calefacción e Iluminación.

Gracias a los descubrimientos antes mencionados, hoy en día, se puede decir entonces que la biodigestión anaerobia es un proceso por el cual se reduce la materia orgánica a compuestos pasivos más sencillos, por medio de bacterias, la cual como producto final es la obtención de biogás (mezcla de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SH}_2$ , entre otros). De acuerdo con Bergarandi, afirma que “las proporciones medias que encontramos en el biogás oscilan entre 50-75% de  $\text{CH}_4$ , un 35-45% de  $\text{CO}_2$  y trazas de restos de compuestos. El poder calorífico del metano puro es de 9.500 kcal/m.3 a 20 mbares, si bien el del biogás oscila entre las 5.000 y 6.000 kcal /m.3” (Echeverria, 1984) (p 4).

Con la información anterior se demuestra que, la biodigestión anaerobia es un proceso un tanto complicado, debido a que requiere de condiciones químicas y físicas para la obtención de biogás, además es requisito indispensable que las bacterias necesarias se forman debido a las siguientes fases (Figura 8):

1. Hidrólisis
2. Acidogénesis
3. Acetogénesis
4. Metanogénesis

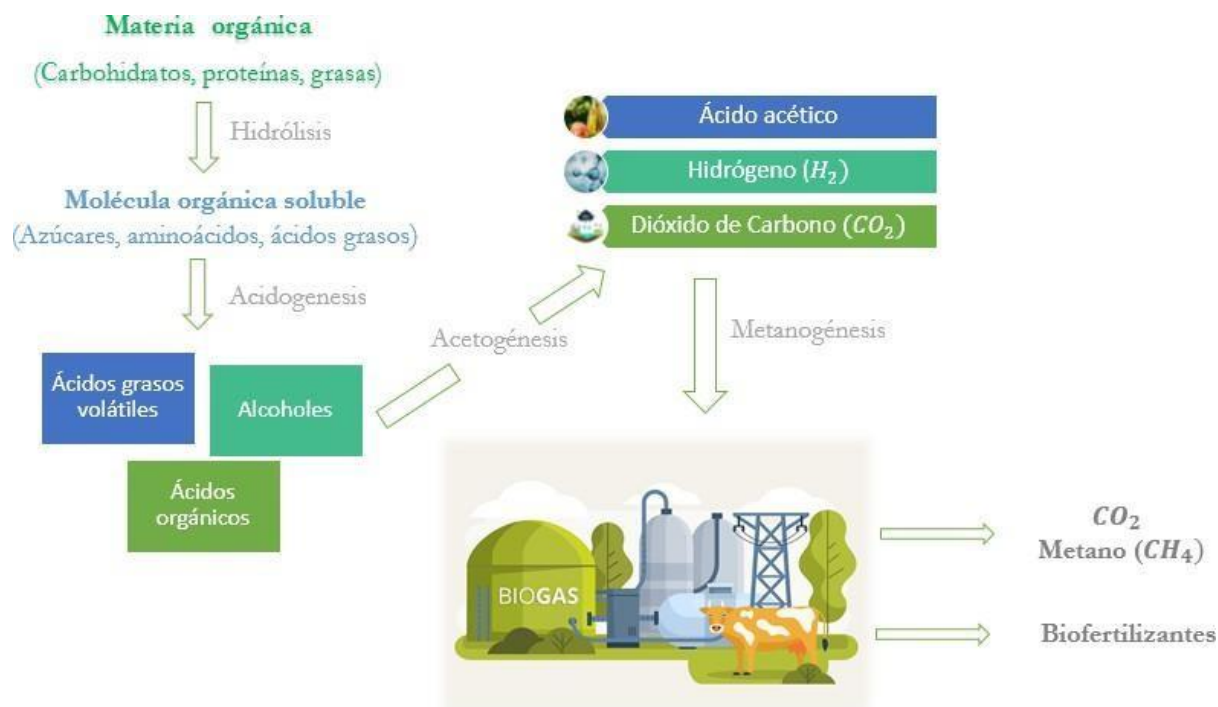


Figura 8. Proceso de la biodigestión anaerobia. Fuente: (Elaboración propia, 2023).

**1.4.1.1 Hidrólisis.** La hidrólisis, como primera etapa, es una reacción de doble descomposición donde el agua representa el reactivo principal. Los reactivos distintos del agua y los productos de la hidrólisis pueden ser moléculas neutras como compuestos orgánicos, o moléculas iónicas, dando resultado de la hidrólisis de sales, ácidos y bases.

La hidrólisis que involucra compuestos orgánicos implica varios pasos debido a que en esta etapa deben descomponerse cadenas largas, de las cuales la más lenta es la formación de un enlace covalente entre el átomo de oxígeno de la molécula de agua y el átomo de carbono del éster. En pasos sucesivos, que son muy rápidos, el enlace de carbono-oxígeno del éster se rompe y los iones de hidrógeno se desprenden de la molécula de agua original y se unen a la molécula de alcohol naciente hidrolizando a las grasas, proteínas y carbohidratos.

Las proteínas se descomponen en aminoácidos, las grasas en ácidos grasos y glicerol, y los carbohidratos en glucosa y otros azúcares simples. En el proceso se libera alguna cantidad de Dióxido de Carbono. (Enciclopedia Británica 2024).

**1.4.1.2 Acidogénesis.** La acidogénesis representa la segunda etapa de las cuatro etapas de la digestión anaerobia. Una vez que los polímeros se convierten en monómeros más simples, después de la hidrólisis, la reacción biológica convierte a los monómeros en ácidos grasos volátiles; esto quiere decir que, se convierten los productos intermedios en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. El crecimiento de bacterias en esta etapa es bastante rápido.

Las bacterias se encargan de hidrolizar y fermentar las cadenas complejas de la materia orgánica en ácidos orgánicos simples, esto quiere decir que, las moléculas complejas (carbohidratos, lípidos, proteínas) se despolimerizan en compuestos solubles mediante enzimas hidrolíticas (celulasas, hemicelulasas, amilasas, lipasas y proteasas) (Aqualimpia Engineering e.K. 2017).

**1.4.1.3 Acetogénesis.** La acetogénesis es un proceso mediante el cual el acetato es producido por microorganismos procariontes (organismos celulares sin núcleo), ya sea mediante la reducción de dióxido de carbono o la reducción de ácidos orgánicos mediante la descomposición oxidativa de carbohidratos o etanol.

De acuerdo con la empresa Alemana Aqualimpia, esta etapa se desarrollan bacterias acetogénicas que se encargan de la degradación de los ácidos orgánicos degradando a los alcoholes, ácidos grasos y compuestos aromáticos produciendo ácido acético liberando a las bacterias metanogénicas como lo son el hidrógeno y el dióxido de carbono. Esta etapa es de alta demanda energética por lo que su proceso de mayor lentitud de hasta cuatro días.

**1.4.1.4 Metanogénesis.** Por conclusión de producción de metano, se encuentra la última etapa de la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaerobias. El proceso lo llevan a cabo bacterias estrictamente anaeróbicas, los aceptores de electrones como el oxígeno, magnesio, hierro, sulfatos, nitratos se reducen, en lo que se acumula hidrógeno, dióxido de carbono y algunos compuestos orgánicos ligeros. En el proceso final de la metanogénesis se reducen los compuestos anteriormente mencionados, por lo que la liberación de dióxido de carbono volátil es mínima. Gracias a los microorganismos llamados metanógenos utilizan el dióxido de carbono para producir metano en la siguiente ecuación 1 (*Aqualimpia, 2017*).



...” En esta fase un segundo grupo de bacterias convierte los ácidos orgánicos en metano y dióxido de carbono. Se trata de bacterias metanogénicas estrictamente anaerobias, es decir que no sobreviven en presencia de oxígeno molecular. Las más importantes son las que transforman los ácidos propanoico y acético, denominadas bacterias metanogénicas acetoclásticas”

## 1.5 Biogás

El biogás es el producto final de la biodigestión anaerobia y está compuesta mayoritariamente por metano y bióxido de carbono, así como también otros elementos en menor (Tabla 2).

Además, el biogás es una poderosísima fuente de energía renovable que produce entre 5.5 y 7 kWh por cada metro cúbico del gas, El biogás es utilizado como fuente de energía sostenible para la generación de electricidad, calor, cogeneración, combustible alternativo al gas natural y de combustible vehicular según sea necesario. Un dato por la Asociación Europea del Biogás indica que, la generación de biogás ha aumentado de forma constante con una tasa de crecimiento del 2% al 2019 y ahorrar hasta 240% de GEI, de tal forma que se inhibe la liberación de metano a la atmósfera de manera incontrolada por la fermentación de desechos orgánicos (European Biogas Association, 2023). Luego, se dice que biogás es un recurso sustentable, la utilización de biogás para la generación de electricidad en zonas rurales para el alumbrado público, el biogás utilizado

como combustible, el cual tiene un valor calórico de 4700 a 5500 kcal/m<sup>3</sup>, así como alimento para los motores de combustión interna, como generadores eléctricos, bombas de agua, herramientas, etc. Además, es susceptible a mejorar la eficiencia limpiándolo de CO<sub>2</sub> el cual logra una pureza del 95% (SARGARPA).

**Tabla 2.**

*Composición del biogás*

<b>GAS</b>	<b>SÍMBOLO</b>	<b>%</b>
<b>Metano</b>	CH <sub>4</sub>	50-70
<b>Dióxido de Carbono</b>	CO <sub>2</sub>	25-40
<b>Hidrógeno</b>	H <sub>2</sub>	<1
<b>Nitrógeno</b>	N <sub>2</sub>	<2
<b>Ácido Sulhídrico</b>	H <sub>2</sub> S	≤0.02
<b>Vapor de Agua</b>	H <sub>2</sub> O	2-7

**Fuente:** (Consejo Nacional de Biogás A.C., 2019).

## 1.6 Tipos de Biodigestores Anaeróbios

Desde hace algunas décadas se han implementado prototipos que contribuyen a la biodigestión anaerobia. Cada uno de estos influyen de acuerdo con las necesidades que requieren los diferentes sectores, pero al mismo tiempo, a las condiciones geográficas que contribuyen para la instalación. Se redacta que la “Depuración biológica de residuos orgánicos con aprovechamiento energético de biogás vía fermentación anaerobia” (Echeverría, 1984) .

Como acontecimiento histórico, Bergerandi cuenta que Durante los años cuarenta, durante la Segunda Guerra Mundial, en Francia y Alemania, se construyeron grandes fábricas productoras de biogás así como los franceses Ducellier e Isman que pusieron a prueba la fermentación de residuos ganaderos (p. 139), y que según, las pruebas se hicieron en biodigestores tipo BATCH,

plantas denominadas “constrúyela usted mismo” para campesinos, el material que ocupaban era en su totalidad en hormigón de mezclado mecánico, el biogás adquirido lo almacenaban en tanques flotantes de cubierta metálica; como dato interesante es que, el gas obtenido se hacía viajar por tuberías hasta las cocinas domésticas y también se utilizaba en los tractores agrícolas (SARGARPA) (p. 12). Lamentablemente, con el fin de la guerra y el auge del petróleo, estas prácticas se dejaron de implementar.

Por último y no menos importante, con la crisis del petróleo en los años setenta y el crecimiento poblacional, los países con mayor demanda, China e India optaron por la puesta en marcha de biodigestores discontinuos, alcanzando para los años ochenta millones de ellos, utilizados para tratar los residuos sólidos. A continuación, se describen los tipos de biodigestores anaerobios como supuestos candidatos para este proyecto de tesis para la propuesta de alguno de ellos dentro del plantel San Lorenzo Tezonco según así lo requiera.

A continuación, se describen algunos ejemplos de los biodigestores más comunes utilizados en la industria dependiendo de la escala y tipo de industria:

1. Biodigestores de flujo continuo: son ideales para grandes volúmenes de residuos; Los residuos orgánicos entran por un extremo y salen por el otro después de un tiempo determinado sin interrupción. Primordialmente, al mantener un flujo constante, las bacterias encargadas de la descomposición trabajan de manera eficiente por lo que hay una mayor producción de biogás y mejor calidad de biofertilizantes en comparación de los sistemas de flujo discontinuo, el tamaño de estos es de grandes proporciones por lo que requieren un espacio considerable, de igual manera, requieren un mayor control de los parámetros de operación. Son utilizados en granjas, industrias alimentarias y plantas de tratamiento de aguas negras.

De acuerdo al tipo de residuos, se plantean los modelos de biodigestores, Los de lecho fijo, el sustrato pasa a través de un lecho fijo de bacterias que permite mayor retención de

sólidos, adecuado para sustratos fibrosos, De membrana, que son utilizadas para separar el biogás del líquido resultante del proceso de digestión, el cual permite mayor pureza del gas y mejor eficiencia; De pistón, la materia orgánica avanza de forma gradual como un pistón (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), 2011).

2. Biodigestor de mezcla completa: los residuos se mezclan constantemente con agitadores mecánicos para la optimización de la digestión, donde sólidos y líquidos se mezclan constantemente, lo que favorece la digestión uniforme, excelentes para sustratos con alta concentración de sólidos. Existen biodigestores de mezcla completa con recirculación y sin recirculación, la primera también llamada, reactor anaerobio de contacto, se utiliza para aguas residuales de alta carga orgánica, por otro lado, el reactor sin recirculación es el más utilizado para cualquier tipo de residuos con tiempo de retención alto.
  
3. Biodigestores de carga discontinua también conocido por lotes, son aquellos donde se introduce la materia orgánica al inicio del proceso y se extra el biogás y efluente al final, cuando se finaliza el ciclo y se reconocen que el rendimiento de es bajo, se vacían los biodigestores y se limpian, tienen tiempo de retención largos pero son sencillos de manipular, estos son los más utilizados en zonas rurales, entre ellos se encuentran el biodigestor Chino, que es un tanque cilíndrico en forma de domo bajo la superficie, es cargado diariamente y los parámetros de operación, no son monitoreados; El modelo Indiano, enterrado verticalmente, cargado de materia orgánica una vez al día, produciendo una carga más o menos constante de biogás, a comparación del modelo Chino, este sistema integra un gasómetro y la salida del biogás es por la parte superior del pozo, según la lectura este presenta una buena eficiencia de producción de biogás (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), 2011).

### ***1.6.1 Parámetros de Operación de los biodigestores anaerobios***

Se encontraron en la lectura diferentes parámetros de operación de los biorreactores, de acuerdo con la FAO (2011), las condiciones de operación que se deben encontrar los biodigestores anaerobios, como buena práctica en el rendimiento y calidad del producto final, son los siguientes:

1. Naturaleza y composición de la materia prima
2. Relación Carbono/Nitrógeno de la materia prima
3. Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles
4. Temperatura
5. Tiempo de retención y velocidad de la carga orgánica
6. Rangos de pH y alcalinidad
7. Niveles de sales
8. Potencial Redox
9. Tóxicos e inhibidores de metano
10. Promotores de la metanogénesis

Más adelante se describen algunos de ellos que son elegidos, considerando la relación Carbono/Nitrógeno que es el parámetro más importante en este trabajo para la elaboración de la calculadora en el programa Excel.

## 1.6.2 Relación C/N

Por lo general casi toda la materia orgánica puede ser sometida a un proceso de biodigestión, esto depende de la composición de la materia prima utilizada. Los residuos para emplear deben cumplir con las condiciones de concentración de macronutrientes para una buena obtención de metano. Los principales compuestos para la generación del biogás son el carbono y el nitrógeno, estos elementos contribuyen a la generación de energía y la formación de nuevas células. De acuerdo con la FAO, la relación C/N, considera un rango de 30:1 a 20:1 debido a que las metanobacterias consumen hasta 30 veces más carbono que nitrógeno (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), 2011).

Si la relación C/N es mayor a 30:1 favorece al retroceso de descomposición y desarrollo de bacterias, de lo contrario si existe una relación menos a 20:1 de C/N, favorece a la creación de amonio lo cual inhibe al metano bacterias. Por lo tanto, si en el caso de que la composición orgánica a degradar se salga de los parámetros previamente establecidos, se tiene que incorporar a la mezcla alguna otra materia prima que facilite al restablecimiento de nuevos parámetros y así poder lograr los datos a desear. En la Tabla 3 se muestra la relación C/N de materias primas generales para obtener una idea de la proporción que existe entre ellas.

Se tiene que para encontrar la relación C/N de las FORSU, en este trabajo, la siguiente Ecuación 2, de acuerdo con la FAO:

$$K = (C_1 * Q_1 + C_2 * Q_2 + \dots \dots C_n + Q_n) / (N_1 * Q_1 + N_2 * Q_2 + \dots \dots N_n + Q_n) \quad (2)$$

Donde:

K=Relación C/N

C=% de carbono en presente en la materia orgánica

N= % de nitrógeno en la materia orgánica

Q= El peso de cada FORSU medida en kg

**Tabla 3.***Tabla de relación de C/N de materias primas generales*

Sustrato	C/N
Excretas bovinas	25:1
Excretas equinas	50:1
Excretas ovinas	35:1
Excretas porcinas	16:1
Paja de trigo	87:1
Rastrojo de maíz	53:1
Hojas secas	41:1
Mezclas de gramíneas follaje abundante	10:1
Mezclas de gramíneas follaje en plena floración	20:1
Mezcla de gramíneas follaje maduro	50:1
Fardo de Alfalfa	16:1
Vísceras de frigorífico	15:1
Harina de sangre	3-10:1
Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU)	11-30:1

**Fuente:** (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), 2011)

### 1.6.3 pH

El pH es una propiedad química que mide la cantidad de acidez o alcalinidad de una mezcla acuosa. De acuerdo con el artículo “pH del suelo y disponibilidad de nutrientes”<sup>1</sup>, considera que el pH es sumamente esencial para el balance de una reacción química y que, en una escala de medición, fluctúa entre 0 a 14, basado con el principio de la constante de equilibrio de disociación del agua de  $10^{-14}$ . Se dan a conocer algunos pH de algunas sustancias (Tabla 4).

<sup>1</sup>(Osorio, 2012)

**Tabla 4.***Ejemplos pH de algunas sustancias comunes*

<b>Sustancia</b>	<b>pH</b>	<b>Sustancia</b>	<b>pH</b>
Agua Pura	7.0	Agua de Lluvia	5.5-5.7
Agua de Mar	8.0-8.3	Agua de Lluvia Ácida	3.0-5.0
Mayoría de suelos ácidos	4.0-6.0	Leche Fresca	6.3-6.6
Jugo de Naranja	3.4-4.0	Sangre	7.2-7.4
Jugo de Limón	2.2-2.4	Solución Jabonosa	8.5-10.0
Café	5.0-5.1	Soda Caustica	12.0-12.5
Coca-Cola	2.5-2.8	Vinagre	4.0-4.5

**Fuente:** (Osorio, 2012)

A partir de Tabla 4 se muestra que el agua con un pH 7.0, es un pH neutro y se considera entonces que, mayor a 7.0 las sustancias comienzan a ser un tanto alcalinas, mientras que las que contienen pH menores a 7.0, las sustancias radican a soluciones con pH ácido. El Manual del Biogás, considera que en un proceso de cultivos mixtos neutro varía entre 6.8 y 7.4. A continuación, se describe el pH adecuado según la lectura. Las condiciones de pH para la *hidrólisis* deben encontrarse entre pH 5.3 y pH 6.7 (el tipo de sustrato y tiempo de retención podría hacer que baje a pH 4.5). Para la *acidogénesis* un rango entre 5.5 y 6. Por último y más importante en la etapa de la *metanogénesis* se debe encontrar 6.8 a pH 7.5 llegando máximo a pH 8.0 (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), 2011). Se demuestra la información anterior de una mezcla (Figura 9).

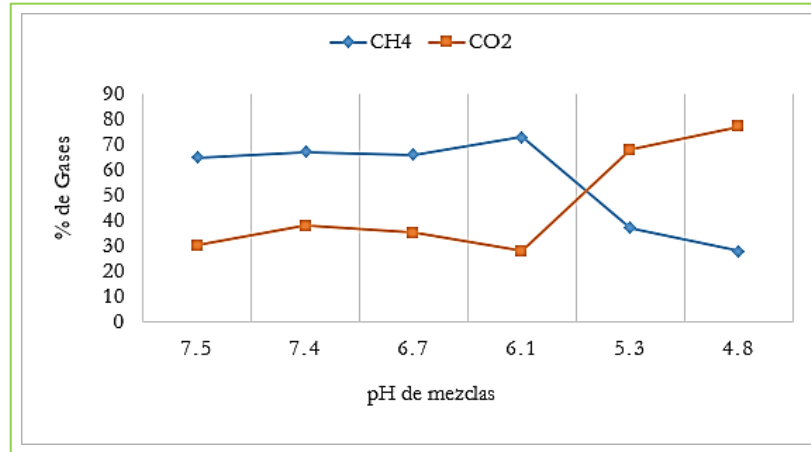


Figura 9. Composición del biogás de una mezcla en función del pH Fuente: (*Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), 2011*).

Se muestra que el pH es esencial como parámetro de operación de los biodigestores anaerobios para una buena producción de metano. Sin este parámetro, la producción de biogás podría no ser óptima, esto quiere decir que, las condiciones de pH no deben bajar de 6.0 ni ser mayores de 8.0, de acuerdo con la lectura en el Manual del Biogás, un pH bajo significa que las bacterias serán inhibidas causando la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) y/o excesiva acumulación de dióxido de carbono, por el contrario, el aumento de pH se debe a la sobreproducción de amoníaco que inhibe el crecimiento microbiano. Se discute entonces que, para que esto no suceda y haya un equilibrio balanceado de pH se tiene que controlar el peso volumétrico de materia orgánica que entra al reactor y así controlar los AGV, otra opción es la entrada de algún químico como el bicarbonato de sodio, carbonato de sodio, hidróxido de amonio, cal, potasio, entre otros; para inhibirlos. El pH es regulado por un medidor, el cual es, preferentemente controlado por un software en un sistema automatizado, que van introduciendo la materia orgánica o los químicos en caso de requerirlo, sin embargo, esta es una práctica sumamente costosa.

#### ***1.6.4 Temperatura, Humedad y Tiempo de Retención***

El proceso de biodigestión anaerobia considera otros factores importantes, que si bien, no son forzosamente aplicados, como en los biodigestores rurales, son considerados cruciales para la

calidad del metano donde la temperatura influye directamente en la actividad de los microorganismos que descomponen la materia orgánica, la humedad es importante para que ocurran las reacciones bioquímicas facilitando el movimiento de los macronutrientes y el tiempo de retención determina el periodo que los microorganismos tardan en descomponerse.

Por un lado, la temperatura es un factor que de él depende el tiempo de la velocidad con la que ocurren las reacciones, debe tenerse sumo cuidado ya que podría dañar los microorganismos que descomponen la materia, donde los rangos óptimos para que ocurra varían de proceso en proceso, sin embargo, las temperaturas óptimas, de acuerdo con la lectura, son entre 35 y 55°C para los rangos de temperatura de los mesófilos y termófilos. Sin esta medición, los procesos anaerobios podrían sufrir algunas consecuencias fisicoquímicas como la afectación al nitrógeno, aumentando la producción de amonio que es un gas tóxico que mata a los microorganismos (Lorenzo Acosta & Obaya Abreu, 2005). Luego, la humedad, como se mencionó anteriormente, la humedad es un parámetro fundamental debido a que los microorganismos tienen mejor rendimiento en un ambiente húmedo. El nivel de humedad óptimo debe encontrarse entre 60% y 80. Si la humedad es poca los microorganismos disminuyen y el tiempo de retención aumenta, de lo contrario, si es muy alta inhibe el crecimiento de la actividad microbiana, así como la liberación de malos olores (Nutrición Personalizada, 2010).

Por último, pero no menos importante, el tiempo de retención el cual se refiere al tiempo promedio que el sólido y líquido permanecen dentro del biorreactor, este factor es sustancial ya que la materia debe estar lo suficientemente en contacto con los microorganismos para llevar a cabo la descomposición, reduciendo así, la cantidad de sólidos y producción de compuestos volátiles y patógenos. En un digestor de carga diaria, el tiempo determina el volumen de orgánicos que son necesarios para alimentar a digestor como se aprecia en la Ecuación 3. Un tiempo de retención demasiado corto provoca que, la materia orgánica no se descomponga completamente, generando espumas y obstrucciones así mismo por lo que el biogás a la salida es mínimo, por otro lado, si el tiempo de retención es demasiado largo, podría provocar la generación de costras y sedimentos en el reactor. Particularmente se trabajan con tiempos de retención de entre 20 y 55 días con cargas diarias de 1 a 5 kg de sólidos totales por metro cúbico del digestor (Organización de las Naciones

Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), 2011). A continuación, se presenta un cuadro comparativo con la información antes mencionada (Tabla 5).

$$\text{volumen de carga diaria } m^3/\text{día} = \frac{\text{volumen del digestor } (m^3)}{\text{Tiempo de retención (días)}} \quad (3)$$

**Tabla 5.**

*Rango aproximado de la temperatura, humedad y tiempo de retención de los biodigestores anaerobios.*

<b>FACTOR</b>	<b>EFEECTO EN LA BIODIGESTIÓN</b>	<b>RANGO ÓPTIMO APROXIMADO</b>
<b>TEMPERATURA</b>		
<b>BAJA</b>	Disminuye la actividad microbiana.	< 15°C (psicrófila)
<b>ÓPTIMA</b>	Aumenta la actividad microbiana y producción de biogás	20-40°C (mesofílica)
<b>ALTA</b>	Inhibe algunos microorganismos sensibles al calor, pero aumenta la velocidad de reacción.	>55°C (termofilia)
<b>HUMEDAD</b>		
<b>BAJA</b>	Disminución de producción de biogás y obstrucción	<60%
<b>ÓPTIMA</b>	Buena actividad microbiana y eficiencia en producción de biogás	60-80%
<b>ALTA</b>	Inhibe microorganismos, pérdida de nutrientes y formación de costras	>80
<b>TIEMPO DE RETENCIÓN</b>		
<b>CORTO</b>	La materia orgánica no se descompone completamente, menor producción de biogás	Dependiente
<b>ÓPTIMO</b>	Completa descomposición, y máxima producción de biogás	Dependiente
<b>LARGO</b>	Aumenta los costos operativos, desarrollo de costras y sedimentos	Dependiente

**Fuente:** (Elaboración propia con datos de fuentes citadas, 2023).

## **1.7 Panorama General de las FORSU que se Originan dentro de las Universidades**

La generación de residuos orgánicos de dentro de las universidades representa un desafío ambiental significativo. Estos desechos provenientes, principalmente de los comedores y cafeterías, contribuyen al aumento incontrolado de residuos. En un estudio realizado dentro de la Universidad Iberoamericana de México reveló que, los residuos orgánicos representan un promedio de 50 % del total de generación dentro de las universidades y junto con el papel y cartón equivalen a 70 %. Mayoritariamente las FORSU son mezcladas en contenedores mixtos, lo que limita las opciones de valorización, aumentando el impacto ambiental (Morales, 2012).

Entre los principales desafíos para la gestión de residuos orgánicos en las universidades se encuentran la falta de infraestructura, la escasa conciencia ambiental de la comunidad universitaria y la insuficiencia de políticas institucionales claras. Sin embargo, existen diversas oportunidades para mejorar la situación, con la implementación de programas de compostaje, promoción de alimentación sostenible y colaboración con empresas de reciclaje (Inova, s.f.).

### ***1.7.1 Desechos Producidos por el Comedor Universitario del Plantel SLT.***

Los desechos sólidos urbanos de materia orgánica producidos al día por el comedor universitario, son generados por una aproximado de 7078 personas (Mendoza, 2019), Mayoritariamente estudiantes, desayunan y comen la comida hecha por el comedor universitario. La generación de residuos orgánicos que se generan dentro de la cocina se mezcla con el desperdicio alimentario de los jóvenes, por lo que los niveles de residuos son bastante grandes, con una media de aproximadamente de 94.700 kg a la semana. Se muestra la porción general de las comidas que se sirven en el plantel (Figura 10), así como le depósito de los desechos que los estudiantes no se comen, depositados en el contenedor verde. En un panorama general, los residuos sólidos urbanos producidos por el comedor universitario del plantel San Lorenzo Tezonco, fueron previamente estudiados por el método del cuarteo por (Fuentes Ayala, 2020), donde se encontró que la

generación de residuos sólidos urbanos, en el comedor, en el mes de febrero (del 11 de febrero al 15 de febrero de 2019), fue de 57707 kg, de ellos 43849 fueron orgánicos, esto quiere decir que la FORSU representó el 76% durante esa semana.



Figura 10. Comedor universitario plantel San Lorenzo Tezonco Fuente: Imágenes tomadas por fuente propia

## 2. Metodología

Para que la relación Carbono/Nitrógeno se genere, es necesario poner en marcha un plan que pueda ayudar a visualizar en la manera más puntual el resultado. Con la ayuda de las normas NMX-AA-15-1985 (Método del Cuarteo) y NMX-AA-022 (Método para la cuantificación), se recolectan los residuos orgánicos del comedor universitario del plantel San Lorenzo Tezonco, la segunda semana de cada mes, durante seis meses (mayo-noviembre de 2023), se separan de acuerdo con su especie y se procede a su pesaje.

Para procesar la relación C/N del %M.O se emplea el Manual del Biogás de la FAO: Se desarrolla un modelo matemático que se visualiza en una hoja de cálculo Excel, de los principales macronutrientes que se compone la materia orgánica (proteínas, lípidos y carbohidratos), dan como resultado la relación C/N, en una relación por cada 100 g de compuesto orgánico (Ecuación 4).

$$K = \frac{C1 * Q1 + C2 * Q2 + \dots \dots C_n + Q_n}{N1 * Q1 + N2 * Q2 + \dots \dots N_n + Q_n} \quad (4)$$

Donde:

K=Relación C/N

C=% de carbono en presente en la materia orgánica

N= % de nitrógeno en la materia orgánica

Q= El peso de cada FORSU medida en kg

### 2.1 Toma de Muestras de los FORSU del Comedor Universitario

Se hace la apertura a las tomas de muestras de las FORSU del comedor universitario, en el día 22 de mayo del 2023. La adquisición de datos se genera por medio de la medición de cada elemento orgánico proveniente del comedor, por cada día de la semana. Lo residuos son llevados a la estación de transferencia, un espacio con piso de concreto, donde se vacían las bolsas de polietileno y se procese a la separación de los residuos heterogéneos, con las medidas de protección, así a su vez y se procede al pesaje en una balanza.

El proceso es realizado al finalizar cada jornada laboral del comedor universitario con el apoyo de tres compañeros de servicio social, se observan las etapas (Figura 11) que se siguieron para la toma de muestras, primero se colectaron los residuos orgánicos que el personal de cocina introdujo en bolsas de poliuretano dentro de un contenedor, en la zona de trabajo procedimos a la puesta de equipo de protección y así poder manipular los residuos, donde se tomaron los datos de la FORSU.



Figura 11. Proceso de medición de las FORSU. Fuente: (Colaboración de los alumnos de servicio social PEUACM, 2023).

### ***2.1.1 Generación per Cápita según la norma NMX-AA-61-1985***

La generación per cápita es un indicador que alude a la cantidad de residuos que genera una persona en promedio de un día. Regularmente este se mide en kilogramos de acuerdo con la norma

NMX-AA-61 (modificado a siete días). Las tomas de muestras con duración de una semana y la generación per cápita se calcula en las siguientes ecuaciones (Chamizo Checa, y otros, 2022). El promedio de los boletos vendidos en la semana se aprecia en la Ecuación 5, con la información de la Tabla 6.

$$\begin{aligned} \text{boletos}_{vp} &= \left( \frac{\text{Total de boletos durante el muestreo}}{7} \right) = \left( \frac{11996}{7} \right) \\ &= 1714 \text{ boletos en promedio al día} \end{aligned} \quad (5)$$

El muestreo se realizó por una semana durante seis meses en el año 2023, calculando la generación per cápita promedio durante seis meses se obtiene con la Ecuación 6.

$$GP_{\text{muestreo}} = \frac{\frac{FORSU}{7 \text{ días}}}{\text{boletos}_{vp}} = \frac{\frac{719.349 \text{ kg}}{7 \text{ días}}}{1714} = \frac{102.67}{1714} = 0.06 \text{ kg/día/persona} \quad (6)$$

Donde:

$\text{boletos}_{vp}$  = boletos vendidos promedio al día (# de personas)

$GP_{\text{muestreo}}$  = Generación per cápita promedio durante el muestreo (kg/día/persona)

FORSU = Peso total de los residuos colectados durante el muestreo (kg).

**Tabla 6.**

*FORSU y boletos colectados en los diferentes meses.*

Mes	Residuos colectados en una semana (kg)	Número de boletos vendidos por semana (7 días)
<b>Mayo</b>	164.040	1068
<b>Junio</b>	76.694	599
<b>Agosto</b>	107141	1135
<b>Septiembre</b>	153.450	2975
<b>Octubre</b>	80.176	3713
<b>Noviembre</b>	46.190	2320
<b>Total</b>	719.349	11996

**Fuente:** Elaboración propia.

### ***2.1.2 Clasificación de Tipo de Residuos Orgánicos Según la Norma NMX-AA-22-1985***

Se refuerza la idea de que los residuos orgánicos son aquellos provenientes de seres vivos, de restos alimenticios, jardín, árboles y excretas de animales. La correcta clasificación de estos residuos es fundamental para su gestión adecuada y para promover la economía circular. La norma mexicana NMX-AA-22-1985 establece los criterios y categorías para la clasificación de los residuos orgánicos, facilitando su manejo y tratamiento.

Dentro de lo criterios para la clasificación se encuentra de acuerdo con su origen, si son desperdicios alimenticios, hojas de jardinería, vísceras, excremento; Contaminantes de los orgánicos, si contienen algunos contaminantes como plásticos, papel, metales otras mezclas extrañas; La cantidad de humedad y; El tamaño de los elementos.

De igual forma, la norma establece las diversas implicaciones prácticas de la clasificación como la mejora de gestión de residuos, tratamiento adecuado para cada residuo, valorización de los residuos, reducción de la generación de residuos, garantizar el cumplimiento de legislación ambiental vigente en materia orgánica. Todo esto permite adaptar los tratamientos a las características de cada tipo de residuo, como la biodigestión anaerobia y el compostaje, así como el tratamiento previo si los residuos contienen materiales tóxicos, etc. (SEMARNAT).

Con a la información anterior, en este trabajo la clasificación recae en residuos de cocina, mayoritariamente se encuentra frutas, verduras, huesos de pollo cocidos y cáscaras de huevo, estos contienen grandes cantidades de humedad y el tamaño de partícula no excede los 40cm y se encontraron algunos contaminantes como residuos de plásticos y papel.

### ***2.1.3 Características Fisicoquímicas de la Materia Prima***

Las características fisicoquímicas de las FORSU son sumamente importantes debido a que, la buena producción del biogás depende intrínsecamente de la cantidad de los carbohidratos, proteínas y lípidos, así como la celulosa, hemicelulosa y la lignina. Estos componentes que contiene la materia orgánica son los encargados de la rapidez con que se biodegradan las FORSU, por lo que, ingredientes como los huesos de animales, la cáscara de huevos y semillas tienen un efecto adverso en los biodigestores, dando como resultado la mala calidad en la producción de metano (González, 2017). Se observan las características fisicoquímicas de cada uno de las FORSU (Tabla 7), que se adquieren durante el estudio, de acuerdo con la tabla de composición de alimentos. Estas medidas son de acuerdo por cada 100 g (Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán, 2016).

**Tabla 7.***Descripción de los macronutrientes.*

<i>Descripción del Alimento</i>	<i>Lípidos (g)</i>	<i>Proteínas (g)</i>	<i>Carbohidratos (g)</i>
<i>Aguacate pellejo</i>	-	1.37	3.7
<i>Betabel</i>	0.12	2.18	1.94
<i>Canela</i>	-	3.8	37.8
<i>Carne con spaguetti</i>	-	6.4	2.4
<i>Cascara huevo</i>	-	-	-
<i>Cebolla</i>	0.18	3.25	7.9
<i>Cebolla cambray</i>	0.13	1.83	7.34
<i>Chile poblano cocido</i>	-	-	-
<i>Cilantro</i>	0.33	2.59	4.72
<i>Col blanca</i>	0.07	2.32	4.34
<i>Espinaca</i>	0.24	2.92	1.63
<i>Frijol guisado</i>	0.39	6.79	12.33
<i>Guanabana</i>	-	1	16.84

**Fuente:** *(Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán, 2016).*

Continuación Tabla 7. Descripción de los macronutrientes.

<i>Descripción del Alimento</i>	<i>Lípidos (g)</i>	<i>Proteínas (g)</i>	<i>Carbohidratos (g)</i>
<i>Guayaba</i>	0.76	0.98	15.57
<i>Huesos de pollo</i>	-	-	-
<i>Huevo blanco entero crudo</i>	8.7	12.3	4.93
<i>Jícama</i>	0.07	1.78	7.89
<i>Jitomate</i>	0.11	0.69	1.3
<i>Lechuga</i>	0.21	1.37	7.12
<i>Limón</i>	0.04	0.78	9.21
<i>Maíz amarillo tortilla</i>	1.6	5.5	47.47
<i>Manzana</i>	0.09	0.32	12.98
<i>Melón</i>	-	0.56	4.64
<i>Naranja</i>	0.07	0.85	9.3
<i>Papaya</i>	0.21	0.52	8.54
<i>Pepino</i>	0.08	0.87	2.44
<i>Pimiento Morrón</i>	0.13	1.09	9.12
<i>Piña</i>	0.06	0.56	8.37
<i>Plátano</i>	0.21	1.09	22.84
<i>Poro</i>	.	2.5	13.17
<i>Sandía</i>	0.11	0.37	3.56
<i>Té de limoncillo</i>	-	4.9	51.1
<i>Tomate cocido</i>	-	-	-
<i>Zanahoria</i>	0.17	0.44	12.34

**Fuente:** (Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán, 2016).

## **2.2 Elaboración de la Calculadora de la Relación C/N Según las Fracciones Orgánicas de los Residuos Sólidos**

En este trabajo, se calcula la relación carbono/nitrógeno de los FORSU muestreadas en el programa de Excel, de acuerdo con la fórmula expuesta en el Manual del Biogás (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), 2011). El cálculo de la C/N es de suma importancia ya que literalmente al haber un desbalance en la relación, conlleva a la pérdida de nitrógeno el cual forma amoníaco inhibiendo los microorganismos de descomposición. Además, al haber una relación adecuada entre el carbono y nitrógeno, puede mejorar la calidad del BIOL resultante. Luego como un plus, la relación C/N, ayuda a clasificar los residuos orgánicos, facilitando la creación de mezclas ideales para aumentar la eficiencia del biogás y el proceso de compostaje. Para la determinación precisa del contenido de carbono y nitrógeno en las sustancias es necesario la toma de muestras en un análisis de laboratorio el cual mide exactamente el contenido de carbono y nitrógeno de las sustancias, por otro lado, muchas de los alimentos comunes son publicados como referencias en tablas o bases de datos, sin embargo, los apuntes pueden variar porque dependen del origen de los alimentos.

En este caso de estudio, se toma como referencia las Tablas de composición de alimentos y productos alimenticios (Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán, 2016), la información descrita se encuentra en el Anexo 2 y los resultados en la Figura 12 y 13. En la determinación de la relación C/N (Ecuación 4).

### **3. Resultados y Discusión**

Es fundamental conocer los resultados del trabajo de investigación ya que permiten evaluar si la hipótesis planteada es correcta. Afortunadamente, las FORSU, con datos obtenidos durante los meses de mayo, junio, agosto, septiembre, octubre y noviembre, fueron satisfactoriamente medidos y, por lo tanto, fueron suficientes para obtener un buen resultado en la calculadora que mide la relación C/N. En el siguiente subcapítulo, se presenta la relación C/N final.

### 3.1 Relación C/N de la FORSU del Comedor Universitario

Ahora bien, la calculadora elaborada en Excel (Figura 12, ejemplo de cómo se ve en el programa), así como los códigos de compilación para la comprobación del dato final. En la Figura 13. El resultado de la relación C/N se muestra en la siguiente Ecuación 7:

$$K = \frac{C1 * Q1 + C2 * Q2 + \dots \dots C_n + Q_n}{N1 * Q1 + N2 * Q2 + \dots \dots N_n + Q_n} = \frac{29.335}{1} \quad (7)$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													
21													
22													
23													
24													

Figura 12. Calculadora en Excel para determinar la relación C/N. Fuente: (Elaboración propia, 2023)

$$\begin{aligned}
&= ((K3*(C3+F3+G3))+(K4*(B4+D4+E4+F4+G4))+(K5*(C5+B5+D5+E5+F5))+(K6*C6)+(K7*(D7+E7+F7))+(K8*(B8+G8))+(K10*(C10+B10+D10+E10+F10+G10))+(K11*B11)+(K12*B12)+(K14*(C14+B14+D14+E14+F14+G14))+(K15*B15)+(K16*(C16+B16+D16+E16+F16+G16))+(K18*(B18+G18))+(K19*(C19+F19))+(K21*(B21+G21))+(K22*(B22+G22))+(K23*(B23+E23+F23+G23))+(K24*(C24+B24+E24+F24+G24))+(K25*(C25+B25+D25+E25+F25+G25))+(K26*(C26+B26+E26+F26+G26))+(K27*(C27+B27))+(K28*(D28+F28+G28))+(K29*(B29+D29+E29+F29+G29))+(K30*(C30+B30+D30+E30+F30+F31))+(K31*(C31+B31+D31+E31+F31))+(K32*C32)+(K33*(C33+E33+G33))+(K34*(B34+D34+E34+F34))+(K35*(C35+B35+D35+E35+F35+G35))+(K36*B36)+(K37*(B37+D37+E37))+(K38*(C38+B38+D38+E38))+(K39*C39)+(K41*(C41+B41+D41+E41+F41+G41))+(K42*(B42+D42+E42+F42+G42))+(K44*(C44+B44+D44+E44+F44+G44))+(K45*(D45+E45+F45+G45))+(K46*(C46+B46+D46+E46+F46)))/((L3*C3)+(L4*B4)+(L5*(B5+C5))+(L6*C6)+(L7*(D7+E7+F7))+(L8*(B8+G8))+(L10*(B10+C10+D10+E10+F10+G10))+(L11*B11)+(L12*B12)+(L14*(C14+B14+D14+E14+F14+G14))+(L15*B15)+(L16*(C16+B16+D16+E16+F16+G16))+(L17*(E17+F17))+(L18*(B18+G18))+(L19*(C19+F19))+(L21*(B21+G21))+(L22*(B22+G22))+(L23*(B23+E23+F23+G23))+(L24*(C24+B24+E24+F24+G24))+(L25*(C25+B25+D25+E25+F25+G25)))+(L26*(C26+B26+E26+F26+G26))+(L27*(C27+B27))+(L28*(D28+F28+G28))+(L29*(B29+D29+E29+F29+G29))+(L30*(C30+B30+D30+E30+F30+G30))+(L31*(C31+B31+D31+E31+F31))+(L32*C32)+(L33*(C33+E33+G33))+(L34*(B34+D34+E34+F34))+(L35*(C35+B35+D35+E35+F35+G35))+(L36*B36)+(L37*(B37+D37+E37))+(L38*(C38+B38+D38+E38))+(L39*(C39+G39))+(L41*(C41+B41+D41+E41+F41+G41))+(L42*(B42+D42+E42+F42+G42))+(L43*(B43+D43+E43+F43))+(L44*(B44+C44+D44+E44+F44+G44))+(L45*(D45+E45+F45+G45))+(L46*(C46+B46+D46+E46+F46))))
\end{aligned}$$

Figura 13. Código de la calculadora de la relación C/N. Fuente: (Elaboración propia, 2023)

Otro dato importante, es que además se hizo una evaluación rápida sobre qué FORSU contienen mayor contenido de carbono y cuáles de nitrógeno, donde se descubrió que, la manzanilla, el pan integral y la tortilla contienen grandes cantidades de carbono, mientras que el queso, aguacate y yerbabuena contienen más nitrógeno que otros alimentos (Figura 14).

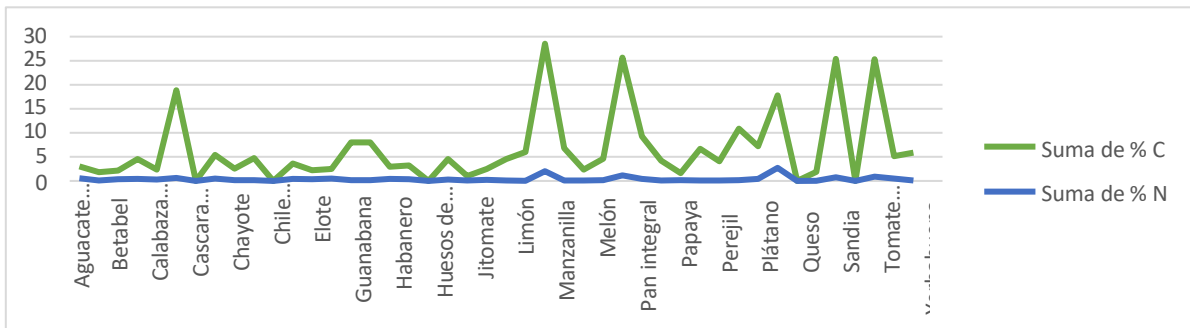


Figura 14. Comparación de los porcentajes carbono y nitrógeno de los alimentos. Fuente: (Elaboración propia, 2023)

### 3.2 Propuesta de Tipo de Biodigestor de Acuerdo con los datos obtenidos

El tipo de biodigestor recomendado se selecciona en base a datos generales, como, por ejemplo, los residuos provenientes son de alimentos producidos por el comedor universitario, mayormente compuestos de vegetales, frutas y huesos de pollo, el contenido de humedad es considerablemente alto y la producción de orgánicos aproximado es de 1000 kg en un mes. Datos particulares como la relación C/N durante el muestreo es cercano a 30/1. Para este trabajo, se selecciona el Reactor Continuo de Mezcla Completa (CSTR) (Figura 15), ya que, dadas las características mencionadas, este biodigestor es perfecto para su implementación dentro de la universidad, sin embargo, existen algunos pros y contras considerables. Este biodigestor es caracterizado por la añadidura de carga periódicamente, quiere decir que sin problemas puede ser llenado día con día, ejemplo modelo chino o indio. La mezcla dentro del reactor es completamente uniforme en todo momento, sin interrupciones (agitación constante), el tiempo de retención es igual al volumen del reactor dividido por el caudal que entra. Entre las ventajas se dice que es fácil de operar y controla las condiciones de temperatura, pH y oxígeno para favorecer el crecimiento de microorganismos, además, el biogás es de alta eficiencia. Entre algunas desventajas se encuentra que los CSTR son sensibles a cambios en la composición y cantidad de residuos entrantes, existe un mayor consumo energético por la puesta de mecanismos, producción de lodos que implica costos de mantenimiento (IDAE, 2007). Es importante recordar que la FORSU del comedor se someta a un pretratamiento antes de ingresarlo a cualquier tipo de biodigestor.

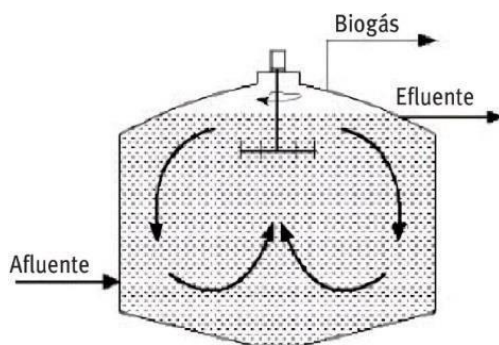


Figura 15. Biodigestor Continuo de Mezcla Completa (CSTR). Fuente: (IDAE, 2007)

### 3.3 Posibles Usos del Biogás Generado

Es importante considerar que los posibles usos del biogás generado dependen de la cantidad de producto, sin embargo, el biogás producido dentro de una universidad puede tener múltiples aplicaciones, convirtiéndola en una institución sostenible y autosuficiente energéticamente. Entre ellos se encuentra la generación de electricidad; El biogás producido por una biodigestión puede atraer bastantes beneficios económicos a una universidad; como por ejemplo poder alimentar los generadores eléctricos para el suministro de energía de los edificios universitarios si se va la luz, inclusive la red eléctrica en general. Para el aprovechamiento como calor; El biogás puede ser quemado directamente por calderas para generar calor dentro de los laboratorios o invernaderos, de igual manera, el biogás puede ser empleado en el comedor universitario para la cocción de alimentos, luego un tratamiento previo al biogás puede generar bioetanol el cual podría mover los vehículos de transporte que se utilizan para la movilidad de los alumnos. Adicionalmente, este puede ser apto dentro de la educación de los jóvenes porque puede servir para diversas investigaciones disciplinarias como la ingeniería, biotecnología y ciencias ambientales.

En cuanto a los ahorros económicos más precisos se necesita más información de la situación actual del mercado como:

- El consumo actual de gas LP en el comedor universitario,
- El costo de producción de biogás, incluyendo los costos de operación y mantenimiento.
- Y el precio a la venta al público.

El porcentaje más preciso del ahorro económico energético se debe estudiar de acuerdo al periodo de la inflación de recursos.

Algo fuertemente de decir es que, el proyecto puede desarrollar reputación a nivel mundial y atraer a más investigadores y estudiantes que estén interesados en el cuidado del medio ambiente, lo cual permite oportunidades de investigación para desarrollo de proyectos interdisciplinarios. La universidad se rige por políticas que, dejan en obra negra los proyectos, conflicto de intereses públicos y no para la educación, sabiendo esto, la investigación personal y experimental, puede compartir a otras academias o empresas privadas para el desarrollo de la universidad San Lorenzo

Tezonco.

### **3.4 Propuesta de Buenas Prácticas Óptimas para la calidad de Biogás**

La calidad de biogás no sólo depende de datos de investigación proporcionados por la lectura, sino que también, deben ser comparados con análisis de laboratorio en cuanto a los residuos sólidos orgánicos producidos por el comedor universitario, para medir el porcentaje de carbono y nitrógeno de cada elemento así como el de la mezcla homogénea, uno de los aparatos de instrumentación que miden esto es en el espectrofotómetro de masas que es altamente sofisticado que se utiliza para identificar y cuantificar sustancias a nivel molecular. Una vez que se tengan identificados los datos precisos de los macronutrientes y también de la cantidad de humedad, pH, es posible la selección del tipo de biodigestor adecuado dentro de la universidad. Además, podría ser buena práctica la instalación de un buen sistema de extracción de gas para evitar pérdidas y

manejar la calidad del biogás. Luego, como se mencionó anteriormente, la práctica de la propuesta de un pretratamiento de los residuos los cuales son de difícil degradación, como los huesos de pollo y las cáscaras de huevo, pueden ser triturados para reducir su tamaño. Se recomienda también que, en dado caso de la instalación del biodigestor, no sea abandonado y se capacite al personal para el adecuado mantenimiento y asegurar que la vida útil de la tecnología sea larga. La implementación de buenas prácticas, la universidad podrá maximizar los beneficios de producción de biogás y contribuir a un futuro más sostenible.

### **3.5 Biofertilizante (BIOL)**

Al final de cada proceso se obtiene el sobrante de los restos orgánicos, a este subproducto se le conoce como biofertilizante o composta. Este digesto obtenido puede utilizarse como fertilizante natural, mejorando la calidad de los suelos y reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos.

Se sabe que, para que el suelo produzca cultivos deseados, es necesario fertilizarlos, agregando elementos como nitrógeno, fósforo y potasio, sin embargo, la mayoría son procesados químicamente en la industria lo cual conlleva a mayor inversión y consecuencias a la salud humana. Afortunadamente con el biofertilizante compuesto de materia vegetal y animal toman un papel ecológico, natural y de muy bajos costos de inversión. El biofertilizante tiene compuestos de minerales que son capaz de influir sobre las plantas y cultivos elevando sus productividades; El fósforo y potasio presentes en los desechos en la planta de biodigestión anaerobia presentan una mínima reducción durante el proceso solubilizando el fósforo; El nitrógeno de los orgánicos en el proceso de biodigestión se transforma en nitrógeno amoniacal el cual es absorbido mejor por las plantas para su crecimiento y como efecto beneficia a la reducción de ácidos del suelo. Otro plus que tiene el biofertilizante es que auxilia a la actividad microbiana de los suelos, incrementando la porosidad, lo cual mejora la retención de la humedad y sobre todo que a diferencia del fertilizante químico el biofertilizante es eficaz durante un periodo de tres años comparado con un año del químico. Otros usos del biofertilizante incluyen, la producción de algas como suplemento de alimentación porcina, como alimento de animales una vez seco, entre otros (SARGARPA).

## CONCLUSIONES

Este proyecto tuvo éxito al lograr los objetivos preestablecidos, primero, al identificar los residuos generados por el comedor universitario, gracias a que a la mayoría de los residuos, fueron depositados en cada bolsa de poliuretano, esto quiere decir que, los trabajadores depositan, en su mayoría, verduras con verduras y frutas con frutas, aunque la bolsa de los residuos, una vez que los alumnos terminan de comer, contiene mezcla homogénea, esto significa que, son restos de lo que consumen los estudiantes.

En segundo lugar, se aplicaron las normas correspondientes, sin embargo, para la NMX-AA-15-1985 (método del cuarteo) se complicó al no contar con la balanza que mide los kilogramos necesarios para el experimento, a pesar de ello, fue suficiente para clasificar y determinar los residuos per cápita. La calculadora que mide la relación C/N en el programa Excel fue fácil de realizar gracias a el Manual del Biogás de la FAO y con datos de los macronutrientes por del Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán de cada una de las FORSU.

Por último, el biodigestor que se propone es apto para la cantidad de kilogramos tipo de residuos orgánicos generados por el comedor de la Universidad, en general, el desarrollo de la calculadora determina la relación carbono/nitrógeno y ha demostrado ser una herramienta valiosa para optimizar el proceso de biodigestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos del comedor San Lorenzo Tezonco.

Los resultados obtenidos indican que una relación C/N, de 29.335/1, favorece la producción de biogás y estabilidad del proceso. Sin embargo, es importante considerar que, para la implementación de un biodigestor anaerobio dentro de la ciudad universitaria, deben considerar otros factores y un estudio más determinado.

Esta investigación reafirma otros trabajos al considerar la urgencia de aplicar programas que promuevan la sostenibilidad del planeta. El Dr. Jorge Wilches Chaux (2005), colombiano que radica en México y fue uno de los primeros investigadores del Programa Integral de los Residuos Urbanos en México, otra personaje fue la Secretaria del Medio Ambiente, Mariana Robles (2024),

que promocionó políticas públicas para la reducción de RSU y fomentar la economía circular, por último pero menos importante la ex jefa de gobierno ingeniería Claudia Sheinbaum, que impulsó a la gestión de los RSU, como la prohibición de plásticos de un solo uso y separación de los residuos de acuerdo que su origen, si bien instituciones gubernamentales no establecen leyes estrictas para el manejo adecuado de los RSU, los colegios tendrían que fomentar la educación ambiental en todos los rangos e inducir a los alumnos que formen una cultura de respeto con el medio ambiente. No obstante, en la era del consumismo, es más difícil dejar de adquirir más cosas que no necesitamos, pero al menos sembrar en nuestro subconsciente y en las futuras generaciones

que, el manejo integral de los residuos sólidos, podría ser la brecha de muchos beneficios tanto económicos, sociales y por supuesto ambientales.

## **Trabajo Futuro**

Futuras investigaciones podrían explorar la aplicación de esta calculadora a una mayor variedad de residuos y la integración de otros parámetros en el modelo para su mejor precisión. Esto quiere decir que, la medición de las FORSU durante las cuatro estaciones del año dentro de la institución educativa, así como el análisis de las muestras, día tras día, durante el estudio hubo mezclas homogéneas que podría ser analizadas en un laboratorio, la determinación de la cantidad de humedad, el pH, así como la medición de las muestras en una báscula más grande. Además, importante la investigación profunda sobre el campo en el dónde se instalará, así como la relación costo-beneficio, etc. En cuanto a las aplicaciones prácticas, la calculadora puede ser aplicada en otras instituciones y con otro tipo de residuos, así como la sofisticación de la calculadora como una aplicación que se pueda desarrollar en Software.

## ANEXO 1

### CEDULA DE INFORME DE CAMPO PARA EL CUARTEO DE LOS RESIDUOS SOLIDOS.

No de Folio. 000 Localidad 07-111-1 Municipio Iztapalapa Estado Ciudad de México Fecha y hora del cuarteo Mayo, Junio, Agosto, Septiembre Octubre y Noviembre de 2023 Procedencia de la Muestra comedor universitario del plantel San Lorenzo Tezonco Condiciones Climatológicas Imperantes Durante el Cuarteo (describa): temperatura promedio de 23°C con muy poca frecuencia de lluvias Cantidad de Residuos Sólidos para el Cuarteo 719.349 kg Cantidad de Residuos Sólidos para la Selección de Subproductos 719.349 kg Cantidad de Residuos Sólidos para los Análisis Físicos, Químicos y Biológicos 719.349 kg Responsable del Cuarteo: Nombre: Shirla Michelle Pantoja López Cargo: responsable para la toma de muestras Dependencia o Institución UACM-SLT Observaciones No se presentó algún inconveniente en la toma de muestras, los cálculos fueron medidos por en su mayoría por 4 personas, se uso equipo de protección como guantes, cubrebocas y overoles. Las FORSU no presentaron inicios de putrefacción de los orgánicos en la toma de muestras, hubo grandes cantidades de lixiviados debido a las frutas y se encontraron muy pocos residuos tóxicos como papel y plásticos y metales. \_

## ANEXO 2

<b>FORSU</b>	<b>Mayo (g)</b>	<b>Junio (g)</b>	<b>Agosto (g)</b>	<b>Septiembre (g)</b>	<b>Octubre (g)</b>	<b>Noviembre (g)</b>	<b>Carbohidratos (g)</b>	<b>Lípidos (g)</b>	<b>Proteínas (g)</b>	<b>% C</b>	<b>% N</b>
<b>Apio</b>	0	384	0	0	167	689	2.97	0.15	0.69	1.809	0.110
<b>Aguacate pellejo</b>	510	0	90	345	80	388	0	1.37	3.7	3.045	0.589
<b>Betabel</b>	522	580	2150	1566	400	0	1.94	0.12	2.18	2.141	0.347
<b>Brócoli</b>	0	100	0	0	0	0	6.64	0.05	2.82	4.526	0.449
<b>Calabaza Criolla</b>	0	0	3832	1750	690	0	3.17	0	1.8	2.390	0.286
<b>Canela</b>	172	0	1400	0	0	240	37.8	0	3.8	18.871	0.605
<b>Cascara huevo</b>	3235	2032	9	4654	2789	4322	0	0	0	0	0
<b>Cebolla</b>	931	109	3139	1678	470	1600	7.9	0.18	3.25	5.418	0.517
<b>Chayote</b>	282	0	0	0	0	0	4.51	0.1	0.82	2.526	0.130
<b>Chile morrón</b>	4207	0	0	0	0	0	9.12	0.13	1.09	4.745	0.173
<b>Chile poblano cocido</b>	356	0	0	567	415	567	0	0	0	0	0
<b>Cilantro</b>	197	117	230	369	130	220	4.72	0.13	2.59	3.608	0.412
<b>Elote</b>	3361	0	0	0	0	0	2.35	0	2.15	2.217	0.342
<b>Espinaca</b>	5285	2499	2955	4423	3810	7230	1.63	0.24	2.92	2.497	0.465
<b>Guanabana</b>	0	0	0	700	427	0	16.84	0	1	8.029	0.159
<b>Guayaba</b>	980	0	0	0	0	1400	15.57	0.76	0.98	8.024	0.156

<b>FORSU</b>	<b>Mayo (g)</b>	<b>Junio (g)</b>	<b>Agosto (g)</b>	<b>Septiembre (g)</b>	<b>Octubre (g)</b>	<b>Noviembre (g)</b>	<b>Carbohidratos (g)</b>	<b>Lípidos (g)</b>	<b>Proteínas (g)</b>	<b>% C</b>	<b>% N</b>
<b>Habanero</b>	0	150	0	0	90	0	3.62	0	2.5	2.972	0.398
<b>Huesos de pollo</b>	10928	6590	7830	2098	9410	7111	0	0	0	0	0
<b>Hojas de col</b>	11310	0	0	0	0	7980	4.34	0.07	2.32	3.247	0.369
<b>Jícama</b>	3367	0	0	0	0	3211	7.89	0.07	1.78	4.530	0.283
<b>Jitomate</b>	230	0	0	1350	39	260	1.3	0.11	0.69	1.037	0.110
<b>Lechuga</b>	12530	4568	0	7240	5200	997	3.53	0.21	1.37	2.473	0.218
<b>Limón</b>	1232	350	815	350	80	897	9.21	0.04	0.78	4.548	0.124
<b>Manzana</b>	906	1678	0	3890	1020	570	12.98	0.09	0.32	6.010	0.051
<b>Manzanilla</b>	603	692	0	0	0	0	48.5	0	12.8	28.535	2.036
<b>Maracuya</b>	0	0	1100	0	980	300	14.4	0.1	0.6	6.802	0.095
<b>Melón</b>	20205	0	18978	35750	8455	23421	4.64	0	0.56	2.367	0.089
<b>Naranja</b>	25355	27114	9715	22850	9370	2313	9.3	0.07	0.85	4.649	0.135
<b>Plátano</b>	463	161	134	254	80	0	22.84	0.21	1.09	10.902	0.173
<b>Pan integral</b>	0	338	0	0	0	0	44.3	2.61	7.3	25.626	1.161
<b>Papa cocida</b>	0	532	0	75	0	654	17.21	0.07	2.86	9.260	0.455
<b>Papaya</b>	470	0	13814	6740	3400	0	8.54	0.21	0.52	4.236	0.083
<b>Perejil</b>	358	117	90	210	231	876	10.93	2.12	0.45	6.693	0.072
<b>Piña</b>	321	0	0	0	0	0	8.37	0.06	0.56	4.070	0.089

<b>FORSU</b>	<b>Mayo (g)</b>	<b>Junio (g)</b>	<b>Agosto (g)</b>	<b>Septiembre (g)</b>	<b>Octubre (g)</b>	<b>Noviembre (g)</b>	<b>Carbohidratos (g)</b>	<b>Lípidos (g)</b>	<b>Proteínas (g)</b>	<b>% C</b>	<b>% N</b>
<b>Pepino</b>	1833	0	78	860	0	0	2.44	0.08	0.87	1.619	0.138
<b>Poro</b>	300	559	380	2953	0	0	13.17	0	2.5	7.216	0.398
<b>Queso</b>	0	121	0	0	0	69	5.25	8.16	17.14	17.801	2.727
<b>Restos, Mezcla</b>	24151	13982	12345	23532	24360	26530	0	0	0	0	0
<b>Sandia</b>	25569	11575	18750	24776	24090	21892	3.56	0.11	0.37	1.866	0.059
<b>Té de limoncillo</b>	455	0	5620	1650	1800	2690	51.1	0	4.9	25.381	0.780
<b>Tomate cocido</b>	946	0	450	654	625	0	0	0	0	0	0
<b>Tortilla</b>	627	1739	2116	1459	960	1444	47.47	1.6	5.5	25.295	0.875
<b>Yerbabuena</b>	0	0	186	62	120	100	7.72	0	3.12	5.132	0.496
<b>Zanahoria</b>	1843	607	935	645	365	0	12.34	0.17	0.44	5.851	0.070
<b>Total</b>	<b>164040</b>	<b>76694</b>	<b>107141</b>	<b>153450</b>	<b>100053</b>	<b>117971</b>	<b>490.11</b>	<b>19.39</b>	<b>101.98</b>		

## Contenido de Figuras

Figura 1. Clasificación de los residuos Sólidos en México 2010-2021 .....	4
Figura 2. Tiradero de RSU a cielo abierto.....	6
Figura 3. Disposición de los Residuos Sólidos del plantel San Lorenzo Tezonco UACM .....	7
Figura 4. Promedio mundial y desglose regional de la composición de los residuos sólidos municipales .....	12
Figura 5. Contenedores del plantel SLT .....	13
Figura 6. Estación de transferencia en el Plantel San Lorenzo Tezonco, UACM .....	14
Figura 7. Estación de transferencia Mayo del 2023, mezcla de RSU.....	15
Figura 8. Proceso de la biodigestión anaerobia.....	21
Figura 9. Composición del biogás de una mezcla en función del pH.....	31
Figura 10. Comedor universitario plantel San Lorenzo Tezonco.....	35
Figura 11. Proceso de medición de las FORSU .....	38
Figura 12. Calculadora en Excel para determinar la relación C/N.....	45
Figura 13. Código de la calculadora de la relación C/N .....	46
Figura 14. Comparación de los porcentajes carbono y nitrógeno de los alimentos.....	46
Figura 15. Biodigestor Continuo de Mezcla Completa (CSTR).....	47

## Contenido de Tablas

Tabla 1. Residuos Biodegradables susceptibles de ser aprovechado .....	17
Tabla 2. Composición del biogás .....	24
Tabla 3. Tabla de relación de C/N de materias primas generales.....	29
Tabla 4. Ejemplos pH de algunas sustancias comunes .....	30
Tabla 5. Rango aproximado de la temperatura, humedad y tiempo de retención de los biodigestores anaerobios .....	33
Tabla 6. FORSU y boletos colectados en los diferentes meses .....	40
Tabla 7. Descripción de los macronutrientes.....	42

## **ABREVIATURAS**

AGV. Ácidos Grasos Volátiles

CDMX. Ciudad de México

C/N. Relación Carbono/ Nitrógeno

CSTR. Reactor Continuo de Mezcla Completa

FAO. Food and Agriculture Organization

FORSU. Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos

GIRSU. Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos

IoT. Internet de las Cosas

LISE: Licenciatura en Ingeniería en Sistemas Energéticos

RSU. Residuos Sólidos Urbanos

SLT. San Lorenzo Tezonco

UACM. Universidad Autónoma de la Ciudad de México

%C Porcentaje de Carbono

%M.O Porcentaje de Materia Orgánica

%N Porcentaje de Nitrógeno

## Bibliografía

- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.* (Octubre de 2020). Obtenido de Mejores Prácticas para la Gestión de los Residuos Sólidos:  
[https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-02/documents/swm\\_guide-spanish-reducedfilesize\\_pubnumber\\_october.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-02/documents/swm_guide-spanish-reducedfilesize_pubnumber_october.pdf)
- Aqualimpia.* (8 de agosto de 2017). Obtenido de Fases de la digestión anaerobia :  
<https://www.aqualimpia.com/digestion-anaerobica/>
- Centro de Calidad Ambiental .* (6 de noviembre de 1992). Obtenido de NMX-AA-61-1985 Protección al ambiente-contaminación de suelo-residuos municipales-determinación de la generación: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa061.pdf>
- Chamizo Checa, S., Suárez Sánchez, J., Muñoz Nava, H., Chamizo Checa, A., Carreón Coca, M. F., & Albuquerque Reyes, V. (2022). Estimación de la generación y composición de los residuos sólidos en Papalotla, Tlaxcala. *Ciencia Latina, Revista Multidisciplinar*, 1-16.
- Consejo Nacional de Biogás A.C.* (2019). Obtenido de ¿Por qué BIOGÁS?:  
<https://www.cnbiogas.mx/que-es-el-biogas>
- Corrales MSc, L., Antolinez Romero, D. M., Bohórquez Macías, J. A., & Corredor Vargas, A. M. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *NOVA*, 55-81.
- Del Carmen Niño, V., Rodríguez Herrera, A. L., Juárez López, A. L., Sampero Rosas, M. L., Reyes Umaña, M., & Silva Gómez, S. E. (2020). La importancia de la participación y corresponsabilidad en el manejo de los residuos sólidos urbanos. *Scielo*, 1-16.
- Echeverría, A. B. (1984). *Institución Píncipe de Viana.* Obtenido de Depuración biológica de residuos orgánicos con aprovechamiento energético de biogás vía fermentación anaerobia: [https://www.culturana Navarra.es/uploads/files/PV\\_ciencias3-4\\_5.pdf](https://www.culturana Navarra.es/uploads/files/PV_ciencias3-4_5.pdf)
- ECOPUMA, U. (s.f.). Manual de Operación del Sistema de Separación de Residuos Sólidos Urbanos. México.
- European Biogas Association.* (2023). Obtenido de EBA Statistical Report 2023:  
<https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical-report-2023/>

- Fuentes Ayala, L. (2020). Programa para el Manejo Integral de los Residuos Urbanos del Plantel San Lorenzo Tezonco de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México. Ciudad de México, México.
- Gaceta Oficial del Distrito Federal*. (25 de junio de 2019). Obtenido de Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal:  
[https://paot.org.mx/centro/leyes/df/pdf/2019/LEY%20\\_RESIDUOS%20\\_SOLIDOS\\_25\\_06\\_2019.pdf](https://paot.org.mx/centro/leyes/df/pdf/2019/LEY%20_RESIDUOS%20_SOLIDOS_25_06_2019.pdf)
- González, N. C. (noviembre de 2017). UNAM. Obtenido de Co-digestión de vinaza y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos para la producción de metano:  
<https://ru.dgb.unam.mx/handle/20.500.14330/TES01000767769>
- IDAE. (octubre de 2007). Obtenido de Biomasa: Digestores anaerobios:  
[https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones\\_idae/documentos\\_10737\\_biomasa\\_digestores\\_anaerobios\\_a2007\\_0d62926d.pdf](https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_10737_biomasa_digestores_anaerobios_a2007_0d62926d.pdf)
- Inova. (s.f.). Obtenido de 5 ejemplos de aplicación de la economía circular en la alimentación:  
<https://inovalabs.es/es/5-casos-de-exito-de-economia-circular-en-alimentacion/>
- Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán*. (abril de 2016). Obtenido de Tablas de composición de alimentos y productos alimenticios:  
[https://www.incmnsz.mx/2019/TABLAS\\_ALIMENTOS.pdf](https://www.incmnsz.mx/2019/TABLAS_ALIMENTOS.pdf)
- López Ramírez, M. A., Sánchez Mota, L., Ocaña Droualillet, K. E., Hernández Guevara, F. A., Rodríguez Martínez, G., & Aburto Gutiérrez, Y. A. (2023). Calidad de los lixiviados producidos en el tiradero a cielo abierto en Tlapacoyan, Veracruz. *Innovación y Desarrollo Tecnológico Revista Digital*, 671-682.
- Lorenzo Acosta, Y., & Obaya Abreu, M. C. (2005). La Digestión Anaerobia. Aspectos teóricos. Parte 1. *Redalyc*, 35-48.
- Martínez Abreu, J., Iglesias Durruthy, M., Pérez Martínez, A., Curbeira Hernández, E., & Sánchez Barrera, O. (2014). Salud ambiental, evolución histórica conceptual y principales áreas básicas. *Revista Cubana de Salud Pública*, 403-411.
- Mendoza, C. M. (mayo de 2019). UACM. Obtenido de El expediente clínico electrónico de la UACM:  
<https://www.repositorioinstitucionaluacm.mx/jspui/bitstream/123456789/127/3/Cirilo%20Mart%C3%ADnez%20Mendoza.pdf>

- México, U. A. (s.f.). Manual de Operación del Sistema de Separación de Residuos Sólidos Urbanos. Ciudad de México.
- Molina Ruiz, H. D., Carreón Guillén, J., Lourdes, M., García Vargas, E., García Lirios, C., & Rojano Chávez, S. M. (2018). Propuesta de uso de la FORSU para la generación de electricidad y apoyo a la mitigación del cambio climático, en un municipio del centro de México. . *Propuestas en Educación y Alternativas para el Desarrollo Comunitario*, 103-122.
- Morales, M. R. (2012). Caracterización de los residuos sólidos en la Universidad Iberoamericana, Ciudad de México. *Scielo*, 93-97.
- Nutrición Personalizada*. (18 de enero de 2010). Obtenido de ¿Qué hace ue los microorganismos crezcan?: [https://nutricionpersonalizada.blog/2010/01/18/microorganismos\\_crezcan/](https://nutricionpersonalizada.blog/2010/01/18/microorganismos_crezcan/)
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO)*. (2011). Obtenido de Manual del Biogás: <https://www.fao.org/4/as400s/as400s.pdf>
- Osorio, N. (2012). pH DEL SUELO Y DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1-4.
- Procuraduría Ambiental y el Ordenamiento Territorial*. (22 de abril de 2003). Obtenido de Ley de los residuos Sólidos del Distrito Federal: [https://paot.org.mx/centro/leyes/df/pdf/2019/LEY%20\\_RESIDUOS%20\\_SOLIDOS\\_25\\_06\\_2019.pdf](https://paot.org.mx/centro/leyes/df/pdf/2019/LEY%20_RESIDUOS%20_SOLIDOS_25_06_2019.pdf)
- Rivera, A. (5 de marzo de 2019). Pide Semarnat regular basureros a cielo abierto por graves consecuencias a la salud . *EL UNIVERSAL*.
- Santos García, J. (diciembre de 2021). *Universidad Miguel Hernández* . Obtenido de Estudio sobre la producción de Biometano para su Inyección en la Red.: <https://dspace.umh.es/handle/11000/26527>
- SARGARPA. (s.f.). *Introducción a la Tecnología de la Digestión Anaerobia*. Ciudad de México. *Secretaría del Medio Ambiente*. (2021). Obtenido de Inventario de los Residuos Sólidos de la Ciudad de México: <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGCPCA/residuos/InventariodeResiduosSolidos2021.pdf>
- Secretaría del Medio Ambiente*. (2021). Obtenido de Programa de Gestión Integral de Residuos para la Ciudad de México:

[https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGEIRA/PGIR/PGIR%202021-2025\\_N\\_ago21.pdf](https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGEIRA/PGIR/PGIR%202021-2025_N_ago21.pdf)

SEDEMA. (8 de julio de 2015). *Gaceta Oficial del Distrito Federal*. Obtenido de Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-024-AMBT-2013 que establece los criterios y especificaciones técnicas bajo los cuales se deberá relizar la separación, clasificación, recolección selectiva y almacenamiento de los residuos del Distrito Federal:

<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/680139/NADF-024-AMBT-2013.pdf>

SEDEMA. (2021). *Inventario de los Residuos Sólidos de la Ciudad de México*. Ciudad de México.

SEMARNAT. (s.f.). Obtenido de NMX-AA-022-1985, Protección al ambiente-contaminación del suelo-residuos sólidos municipales-selección y cuantificación de subproductos :

<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/NMX-AA-022-1985.pdf>

SEMARNAT. (s.f.). Obtenido de NMX-AA-015-1985 Protección al ambiente-contaminación del suelo-residuos sólidos municipales-muestreo-método de cuarteo:

<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/NMX-AA-015-1985.pdf>

SEMARNAT. (s.f.). Obtenido de NMX-AA-022-1985 Protección al ambiente-contaminación del suelo-residuos municipales-selección y cuantificación de subproductos:

<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/NMX-AA-022-1985.pdf>

Tezonco, C. S. (2021). *UACM*. Obtenido de Informe Anual 2020-2021:

[https://web.siiia.unam.mx/ods-unam/archivosTHE/manual%20de%20RSU\\_oper\\_web.pdf](https://web.siiia.unam.mx/ods-unam/archivosTHE/manual%20de%20RSU_oper_web.pdf)

United Nations Environment Programme. (2024). *Global Waste Management Outlook 2024*.

Obtenido de Beyond an age of waste: <https://unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024>

United Nations Environment Programme. (2024). Obtenido de Beyond an age of waste:

<https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/44939>

Vázquez Arteaga, Y., Pérez León, E., Rojas Juárez, L., & Acelmo Ramírez, J. (2020). Ley de la Conservación de la Energía. *TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río*, 62-65.

Vernero Moreno, M. T. (2011). *Food and Agriculture Organization*. Obtenido de Manual del Biogás: <https://www.fao.org/4/y4705s/y4705s.pdf>

Zupancic, G. D., & Grilic, V. (2012). Anaerobic Treatment and Biogas Production from Organic Waste. *Managment of Organic Waste* , 3-28.