



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla



Facultad de Ingeniería Química

“Aprovechamiento energético proveniente de un bioproceso
aplicado a la transformación de residuos”

TESIS

Para obtener el título de:

Ingeniera Química

P R E S E N T A

Karen Regina Salas Pagan

Directora de tesis:

Dra. Maribel Castillo Morales

Codirector de tesis:

Dr. Daniel Cruz González

Ciudad Universitaria, Puebla, Pue.

A 14 DE AGOSTO DEL 2024.

ÍNDICE GENERAL

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
JUSTIFICACIÓN.....	2
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	3
HIPÓTESIS NULA	3
HIPÓTESIS ALTERNATIVA	3
ALCANCE.....	3
OBJETIVO GENERAL.....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
MARCO TEÓRICO	3
I. <i>Antecedentes de la investigación.</i>	3
II. Conceptos Básicos.....	4
A) Residuos Orgánicos	4
B) Compostaje.....	6
C) Productos vinculados con el compost.	14
D) Producción de energía a partir de la biomasa.....	16
D.1) Propiedades fisicoquímicas de las frutas y verduras.	17
D.2) Composición química.....	17
D.3) Relación con la producción de energía eléctrica	19
D.4) Alimentos capaces de generar electricidad	19
E) Métodos de obtención de energía a partir de la biomasa.....	20
E.1) Sistemas bioelectroquímicos (SBE) y su función.....	21
E.2) Celdas combustibles microbianas	22
F) Circuitos eléctricos.....	23
F.1) ¿Qué son?.....	23
F.2) Resistencias de los conductores eléctricos.....	24
F.3) Condensadores en los circuitos.....	24
F.4) Tipos de circuitos eléctricos.....	25
F.5) Circuito en serie	25
G) Métodos estadísticos.....	26
G.1) Coeficiente de correlación de Pearson.....	27
G.2) Análisis de varianza (ANOVA)	27
Marco Legal	28
METODOLOGÍA.....	31

1.1 Diseño.....	31
1.2 Construcción de las celdas combustibles microbianas (CCMs)	31
1. Crecimiento y masificación de las cepas bacterianas	32
2. Armado de composta a base de la selección de residuos orgánicos (frutas, verduras y hortalizas).....	32
3. Adición de inóculos a las CCMs.....	34
4. Selección y construcción del circuito eléctrico.....	35
1.3 Medición y reporte de los parámetros de control de las CCMs.....	35
RESULTADOS	37
Datos de los parámetros de control:.....	38
1. Potencial de Hidrógeno	38
2. Humedad.....	39
3. Temperatura.....	41
4. Voltaje	43
DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	44
ANOVA	47
Coeficiente de correlación de Pearson	51
CONCLUSIONES	53
RECOMENDACIONES.....	53
BIBLIOGRAFÍA.....	54

ÍNDICE DE TABLAS

T.1 Intervalo de valores según los parámetros de control en la fase mesófila. Elaboración propia con información obtenida de (Temperatura y pH en el proceso de compostaje Productos para agricultura Hanna Instruments, s. f.)	9
T.2 Intervalo de valores según los parámetros de control en la fase termófila. Elaboración propia con información obtenida de (Temperatura y pH en el proceso de compostaje Productos para agricultura Hanna Instruments, s. f.)	10
T.3 Intervalo de valores según los parámetros de control en la fase de enfriamiento. Elaboración propia con información obtenida de (Temperatura y pH en el proceso de compostaje Productos para agricultura Hanna Instruments, s. f.)	10
T.4 Relación C:N de algunos materiales usados en el compostaje. Elaboración propia con información obtenida y adaptada de PNUD-INFAT (2002).	13
T.5 Sistemas bioelectroquímicos, (de elaboración propia con información obtenida de las fuentes mencionadas).	22

Tabla 6. Selección de los residuos orgánicos para las CCMs. Elaboración propia con datos experimentales.....	33
Tabla 7. Datos de cada lote CCMs al día uno. Elaboración propia con datos experimentales.	37
Tabla 8. Monitoreo de pH por lote en las once semanas de duración del proyecto. Elaboración propia con datos experimentales.....	38
Tabla 9. Monitoreo de la humedad por lote en las once semanas de duración del proceso. Elaboración propia con datos experimentales.	39
Tabla 10. Datos del grado de humedad en porcentaje para una composta.Elaboración propia con información obtenida de: Casco, J. M., & Bernat, S. M. ,2008.	40
Tabla 11. Monitoreo de la temperatura por lote en las once semanas de duración del proceso. Elaboración propia con datos experimentales.	41
Tabla 12. Fechas de cada semana con sus condiciones climáticas y T° en °C; elaboración propia con información tomada de: AccuWeather, s. f.	42
Tabla 13. Monitoreo del voltaje obtenido por lote en las once semanas de duración del proceso. Elaboración propia con datos experimentales.	43
Tabla 14. Cuadro comparativo con el proyecto de CCM tipo PEM. Elaboración propia con datos experimentales de este proyecto y los recuperados de (Alzate-Gaviria et al., s. f.).	45
Tabla 15. Datos experimentales por parámetro. Elaboración propia con datos experimentales de este proyecto. Origin Pro v.9.9.5.....	47
Tabla 16. Datos experimentales por parámetro. Elaboración propia con datos experimentales de este proyecto. Origin Pro v.9.9.5.....	48
Tabla 17. Resultados del ANOVA. Elaboración propia con datos experimentales del proyecto. Origin Pro v.9.9.5.	48
Tabla 18. Resultados del ANOVA. Elaboración propia con datos experimentales del proyecto. Origin Pro v.9.9.5.	48
Tabla 19. Resultados del ANOVA. Elaboración propia con datos experimentales del proyecto. Origin Pro v.9.9.5.	49
Tabla 20. Valores calculados de la media de cada uno de los parámetros. Elaboración propia con datos experimentales del proyecto. Origin Pro v.9.9.5 2024	50
Tabla 21. Reporte de los valores mínimos y máximos de cada parámetro. Elaboración propia con datos experimentales de este proyecto.	51
Tabla 22. Resultados de los cálculos para la correlación del coeficiente de Pearson. Elaboración propia con datos experimentales del proyecto. Origin Pro v.9.9.5.....	51
Tabla 23. Resultados de los cálculos para la correlación del coeficiente de Pearson. Elaboración propia con datos experimentales del proyecto. Origin Prov.9.9.5	52

ÍNDICE DE IMÁGENES

Fig.1. Clasificación de los residuos orgánicos. Elaboración propia con información de: (Residuos orgánicos, Repsol, 2023).	5
Fig.2. Ilustración del proceso del compostaje.....	6
Fuente: (Composting Pilot Malvern Borough, PA, s. f.)	6
Fig.3. Mención de los parámetros de monitoreo para el compostaje tradicional. Elaboración propia con información de: (Román et al., 2013).	7
Fig.4 Pilas de compostaje (sistemas abiertos) Fuente: M.A. Martínez. Directora planta de compostaje municipal, Nicaragua.	11
Fig.5 Sistema de aireación forzada. Fuente: FAO,2013.....	12
Fig.6 Sistema de recolección de lixiviados. Fuente: FAO,2013.....	12
Fig.7 Sistema de pilas con volteo mecanizado. Fuente: FAO,2013.....	12
Fig.8 Tipos de recipientes usados como compostera. Fuente: A. Pantoja. CDC de Villanueva, Honduras.....	14
Fig.9 Parte de la materia prima utilizada para la conformación de las compostas.....	33
Fig.10 Unidades experimentales rotuladas en función del número de cepa y el tipo de residuo.....	34
Fig.11 Adición de inóculos bacterianos correspondientes a cada unidad.....	34
Fig.12 Bobinas elaboradas con tornillos galvanizados y alambre de cobre.....	35
Fig.13 Medición de temperatura y pH de las CCMs.	36

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Comportamiento del pH a lo largo del tiempo. Elaboración propia con datos experimentales.	38
Gráfica 2. Incremento de la humedad a lo largo del tiempo. Elaboración propia con datos experimentales.....	40
Gráfica 3. Comportamiento de la temperatura a lo largo del tiempo. Elaboración propia con datos experimentales.	41
Gráfica 4. Comportamiento del voltaje a lo largo del tiempo. Elaboración propia con datos experimentales.....	43
Gráfica. 5 Gráfico de barras representando el valor de la media. Elaboración propia con datos experimentales de este proyecto.	49
Gráfica. 6 Gráfico de cajas representando del valor mínimo al máximo de cada parámetro. Elaboración propia con datos experimentales de este proyecto.....	50
Gráfica 7. Matriz de dispersión representando del valor mínimo al máximo de cada parámetro. Elaboración propia con datos experimentales de este proyecto.....	52

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La demanda energética mundial se basa principalmente en fuentes de energía convencionales no renovables, como carbón, gas natural y petróleo, lo que llevará a la explotación de las reservas de combustibles fósiles en un futuro cercano. México es un importante productor de energía eléctrica, pero su generación se basa en el combustóleo, lo que genera contaminantes como SO_x, NO_x, COV, CO, PM₁₀ y PM₂₅ que afectan la calidad del aire. (CYD, n.d.). Debido a la crisis del precio del petróleo de la década de 1970 se impulsó el desarrollo de alternativas a estos y otros combustibles fósiles, por lo que los posibles efectos de su uso ya se conocían en la década de 1980. El uso de fuentes de energía renovables está aumentando debido al incremento de los costos de la electricidad y las preocupaciones sobre el impacto ambiental de los combustibles fósiles. La demanda mundial de energía ha crecido significativamente en las últimas décadas y se espera que aumente en más del 50 % para 2030. (Mondal, A. K., & Bansal, K. 2015).

Otro de los problemas a enfrentar es la generación desmesurada de desechos orgánicos y la falta de tratamiento de estos; en México, anualmente se generan 44 millones de toneladas de RSU, es decir, 120,128 toneladas diariamente (SEMARNAT, 2020).

De acuerdo con los datos de la comisión para la cooperación ambiental, la generación total anual per cápita de residuos orgánicos en México es de 327.3 millones de toneladas, de los cuales, sólo el 7% es aprovechada por medio de actividades como digestión anaerobia y compostaje industrial (CCA, 2017). El conocimiento sobre la composición de los RSU tiene como finalidad fundamental determinar los subproductos o fracciones de los residuos que son aprovechables o que pueden ser valorizados, así como determinar cuáles son los sistemas más adecuados para ello.

En ese sentido, el 44% de los RSU están compuestos por residuos orgánicos (restos de comida, poda y jardinería), cifras que los sitúan como la fracción de mayor representación de los RSU a nivel mundial (Kaza et al., 2018). Dicho lo anterior, se busca mitigar en la medida de lo posible la contaminación generada por el combustóleo mediante el aprovechamiento de la desmesurada cantidad de desechos orgánicos con alternativas renovables. Una de estas alternativas, es la generación de energía eléctrica a partir de la conformación de una celda de combustión microbiana con objeto de estudiar el calor producido por el compostaje de residuos orgánicos mediante la elaboración de una celda de combustible microbiana (CCM).

JUSTIFICACIÓN

A lo largo de los últimos años, México ha mostrado un mayor interés en la generación de electricidad a través de fuentes de energía renovable. Aunque la producción de electricidad en el país sigue dependiendo en gran medida de los combustibles fósiles, se han realizado avances significativos en la implementación de alternativas renovables.

El uso de combustóleo para generar electricidad emite una gran cantidad de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de azufre (SO_x) y óxidos de nitrógeno (NO_x), PM 2.5, PM10 y COV; los cuales tienen un impacto negativo en la calidad del aire y, por ende, la salud humana. México es un país que aún depende en gran medida de los combustibles fósiles para la generación de electricidad, lo cual implica una vulnerabilidad ante los cambios en los precios internacionales del petróleo y el gas sin olvidar el impacto ambiental que esto genera a largo plazo. Las inyecciones a la red de la generación propia de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) a través de tecnologías limpias ha ido incrementando con el paso del tiempo, lo que ha permitido que hasta septiembre de 2021 la generación de energía eléctrica con base en energías limpias ascienda a 37.52% de un total de generación de 98,635 GWh. A nivel nacional la generación limpia aportada por las centrales propias de las CFE representa el 55% de la generación limpia total en el sistema eléctrico (Portal CFE, s. f.).

La utilización de una celda de combustión microbiana con compostas reduce en gran medida la dependencia de los combustibles fósiles para la generación de electricidad, fortaleciendo la seguridad energética del país y promoviendo la diversificación de la matriz eléctrica hacia fuentes más limpias y sostenibles. Tomando en cuenta que en México se generan 44 millones de toneladas de RSU al año, de los cuales el 44% corresponde a desechos orgánicos, por lo que se propone una solución ante esta problemática, la cual es el aprovechamiento de estos residuos en la elaboración de compostas y éstas a su vez, convertirlas en celdas de combustión microbiana. Las celdas de combustión microbiana (CCM) utilizan microorganismos para descomponer los desechos orgánicos y generar electricidad de forma renovable, sin generar emisiones significativas de gases contaminantes. La generación de electricidad a partir de compostas como CCMs, puede impulsar el desarrollo de un sector de energías renovables en México, creando oportunidades de negocio y generando empleo en áreas relacionadas con la producción, el mantenimiento y la gestión de estas celdas de combustión microbiana. El uso de compostas como fuente de energía puede ayudar a reducir los costos asociados a la eliminación de los residuos orgánicos, al aprovecharlos como materia prima para generar electricidad.

En resumen, la elaboración y uso de una celda de combustión microbiana para la generación de electricidad con compostas, es una opción sostenible, limpia, aprovechable, económicamente en contraste a la electricidad generada tradicionalmente por combustóleo en México. Además de representar un punto de oportunidad de estudio.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál será la efectividad de una celda de combustión microbiana para la generación de electricidad a partir de un bioproceso anaerobio aplicado?

HIPÓTESIS NULA

La producción de energía eléctrica en las CCMs resulta factible para su aprovechamiento como una fuente de energía renovable.

HIPÓTESIS ALTERNATIVA

La producción de energía eléctrica en las CCMs no resulta factible para su aprovechamiento como una fuente de energía renovable.

ALCANCE

Se elaborará una investigación exhaustiva teórica para generar una base de datos fundamentados, los cuales serán empleados para el diseño y construcción de una celda de combustión microbiana para el aprovechamiento de la energía producida por el bioproceso.

OBJETIVO GENERAL

Demostrar que el rendimiento energético de la celda combustible microbiana genera electricidad constante y dicha electricidad podría ser almacenada para su uso.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir un prototipo de celda de combustión microbiana utilizando los materiales y recursos disponibles.
- Medir el efecto de las variables de control (temperatura, pH, humedad y voltaje) para poder evaluar el rendimiento energético de la celda.

MARCO TEÓRICO

I. Antecedentes de la investigación.

Anteriormente se han realizado investigaciones e hipótesis acerca de la generación de energía eléctrica a partir del compostaje de residuos orgánicos, sin embargo, hasta ahora no se tiene ningún registro de algún sistema que involucre este proceso en condiciones anaeróbicas.

II. Conceptos Básicos

A) Residuos Orgánicos

Los residuos orgánicos son todos aquellos residuos de origen natural (ya sea vegetal y animal) que tienden a descomponerse con facilidad y transformarse en otro tipo de materia orgánica.

Estos representan una parte relevante de los desechos que se generan en los hogares, negocios, industrias y las actividades agrícolas. Su acumulación en los vertederos o en las incineradoras fomenta la contaminación del suelo, así como la emisión de gases de efecto invernadero. Sin embargo, una eficiente gestión de este material orgánico y su reutilización contribuyen a la promoción de la sostenibilidad del planeta impulsando la economía circular. Durante siglos, los agricultores utilizaron los restos orgánicos para mantener la fertilidad de sus campos. Esta práctica se basaba en tratar de reproducir los procesos que la naturaleza lleva a cabo para la descomposición y reutilización de la materia orgánica en el suelo, donde los nutrientes son liberados y vuelven a absorberse por las plantas.

En la actualidad, el impacto ocasionado por el cambio climático ocasionado por la cantidad desmesurada de residuos sólidos urbanos (RSU) que generamos tiene más importancia de la que imaginamos. El sector de los residuos es uno de los tres principales emisores de metano (CH₄), con el 20 % de las emisiones provocadas por el hombre en todo el mundo. (Residuos Orgánicos: ¿Qué Son y Cómo Tratarlos? - Repsol, 2024)

A.1) Tipos de residuos orgánicos

Al momento de clasificarlos para su aprovechamiento, existen dos grandes grupos que difieren tanto en características y composición como en su eliminación o transformación.

Los más usuales son los que se denominan FORM (Fracción Orgánica de Residuos Municipales), que son los que proceden de alimentos y otros elementos de los hogares y el comercio.

El segundo grupo se conoce como FV (Fracción vegetal), el cual se genera en las zonas verdes y sitios con vegetación, tanto del sector público como privado. A su vez, esta clasificación de los residuos orgánicos se subdivide en los siguientes tipos:

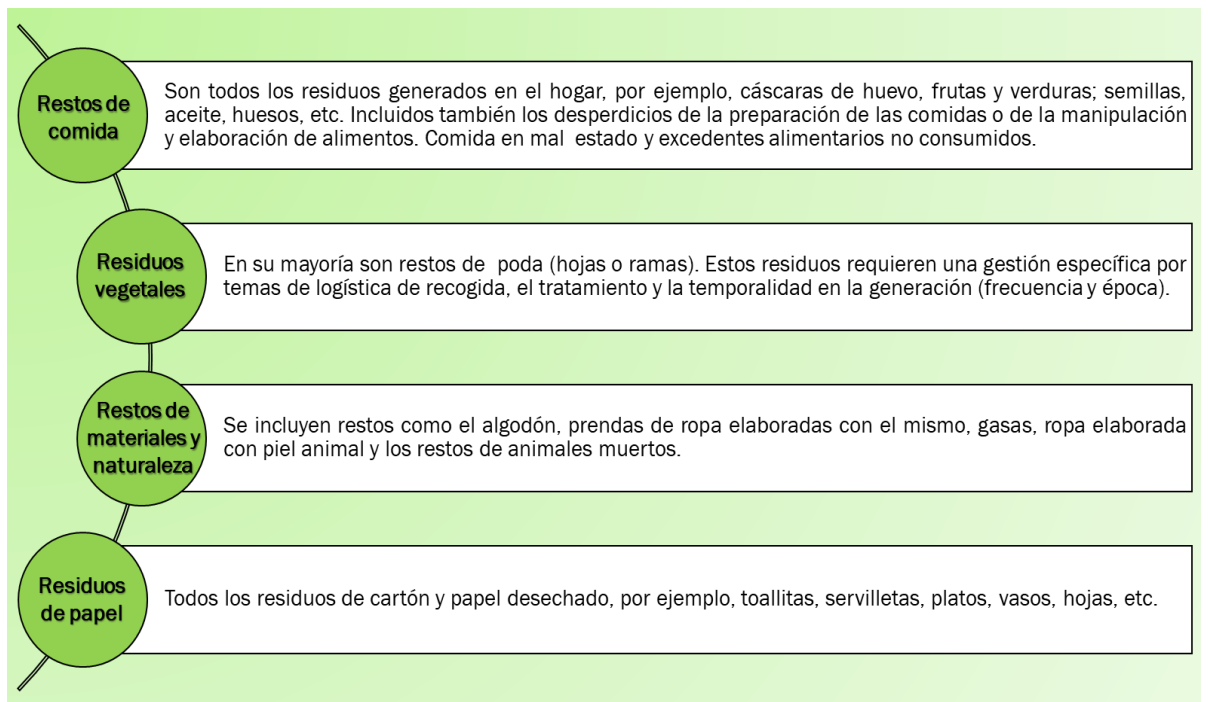


Fig.1. Clasificación de los residuos orgánicos. Elaboración propia con información de: (Residuos orgánicos, Repsol, 2023).

A.2) Repercusión ambiental de los residuos orgánicos.

Alrededor del 80% de la población que vive en zonas urbanas, son responsables del 70% del desperdicio en el mundo y en ellas se consume casi el 80% de la energía mundial. La inadecuada gestión de los residuos orgánicos, por un lado, impide su aprovechamiento (como es el caso de los combustibles renovables) y, por otro, puede afectar al medio ambiente de diversas maneras:

- **Generación de gases de efecto invernadero:** La acumulación y descomposición de los desechos orgánicos en los vertederos o en condiciones anaeróbicas producen metano, un gas de efecto invernadero que, debido a su estructura, retiene más calor en la atmósfera por molécula que el dióxido de carbono. Dicho gas es el responsable de aproximadamente el 30% del calentamiento global.
- **Contaminación de suelo y agua:** El resultado de una mala gestión de los residuos orgánicos puede dar lugar a la filtración de estos en los cuerpos de agua, contaminando ríos, lagos y mantos acuíferos. Además, su acumulación sin control sobre el suelo perjudica los nutrientes y afecta de forma negativa la calidad de las tierras de cultivo.
- **Generación de malos olores y plagas:** Los residuos orgánicos en descomposición producen olores fétidos y desagradables que,

a su vez, atraen plagas de insectos y de animales. Esto puede producir gérmenes en la zona y ser el foco de enfermedades infecciosas.

- **Pérdida de recursos:** Los residuos orgánicos contienen nutrientes valiosos que se pueden usar como fertilizantes naturales o como base para generar fuentes de energía sostenibles. Si estos recursos no se aprovechan adecuadamente, se pierde el beneficio que nos pueden brindar. (Residuos orgánicos, Repsol, 2023)

B) Compostaje

B.1) ¿Qué es?

El compostaje es un proceso biológico de descomposición en el cual la materia orgánica se transforma gracias a la actividad de los microorganismos (bacterias, hongos) generados por el mismo y por seres detritívoros como lombrices, escarabajos, entre otros (en caso de utilizarlos), de tal manera, que en condiciones favorables (temperatura, humedad y aireación) se logre realizar la fermentación de estos residuos y de esta manera, acelerar el proceso.

Es de suma importancia transformar los residuos orgánicos en compost para así obtener abono, así pues, mitigamos la cantidad de residuos que irían a parar a un relleno sanitario.

Se ha demostrado que la presencia de microorganismos en todos los residuos inertes y biológicos son capaces de degradar la materia orgánica; por acción de la oxidación se desprenden electrones al medio donde se podrían aprovechar por medio de las CCM al posibilitar y registrar la energía eléctrica.



Fig.2. Ilustración del proceso del compostaje.
Fuente: (Composting Pilot | Malvern Borough, PA, s. f.)

B.2) Definición de las fases del proceso de compostaje.

Como se mencionó anteriormente, el compostaje es un proceso biológico en condiciones aeróbicas, donde la humedad y la temperatura son fundamentales para asegurar la adecuada conversión higiénica de los residuos orgánicos en una mezcla homogénea que pueda ser absorbida y aprovechada por las plantas.

También puede explicarse como un conjunto de complejos procesos metabólicos llevados a cabo por diversos microorganismos que utilizan la presencia de carbono y nitrógeno para producir su biomasa en presencia de oxígeno. Además, durante el proceso los microorganismos producen reacciones exotérmicas (calor) y un sustrato sólido estable llamado compost.

B.3) Parámetros de control

Los parámetros de control para monitorear la composta de manera correcta son:

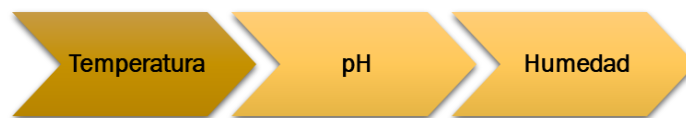


Fig.3. Mención de los parámetros de monitoreo para el compostaje tradicional. Elaboración propia con información de: (Román et al., 2013).

Temperatura: Es el parámetro más relevante del proceso, esto se debe a que la naturaleza del material, el estado de fermentación, descomposición de la materia orgánica, entre otros, pueden evaluarse a través de la evolución de la temperatura. En primera instancia, la temperatura que constituye la composta es la misma.

Sin embargo, a medida que el proceso va avanzando, la temperatura va incrementando, lo cual nos indica que el proceso va por el camino correcto. (Innovatione Agro Food Design, 2021).

La temperatura es un factor clave en la velocidad de descomposición de la materia orgánica durante el compostaje. La temperatura óptima se sitúa entre 45 y 59°C, ya que temperaturas menores de 20°C pueden frenar el crecimiento microbiano y, por lo tanto, la degradación de los materiales. Por otro lado, temperaturas superiores a 59°C pueden inhibir el desarrollo de los microorganismos o incluso eliminarlos, lo que reduce la tasa de descomposición microbiana.

Los microorganismos tienden a degradar la materia orgánica más eficientemente cuando se encuentran en el límite superior de su rango de temperatura de crecimiento. Por lo tanto, un proceso de compostaje es más efectivo cuando las temperaturas se mantienen en niveles elevados que permitan el crecimiento microbiano sin inhibición. En este sentido, el proceso de compostaje parece autolimitante, ya que la generación y acumulación de calor no permite que las temperaturas medias superen los 60°C, lo que es suficiente para asegurar la muerte de patógenos humanos y vegetales. (Casco, J. M., & Bernat, S. M. ,2008)

pH: Este parámetro mide la concentración de iones hidronio presentes en el objeto de estudio. Su valor varía en una escala del 0 al 14, dónde los valores por debajo de siete indica un pH ácido, iguales a siete un pH neutro y mayor a siete, básicos. Además, puede condicionar la actividad biológica que degrada la materia orgánica y puede elegir a las poblaciones microbianas presentes en cada etapa.

Generalmente, las bacterias prefieren un pH cercano a la neutralidad con un intervalo entre 6-7,5, mientras que los hongos se desarrollan mejor en medio ácido, aunque toleran un margen más amplio de pH (5-8).

Aunque el compostaje puede desarrollarse dentro de un amplio rango de pH (3-11), se consideran como valores óptimos los comprendidos entre 5.5 y 8. Cabe resaltar que, las altas temperaturas y los valores de pH básicos favorecen la pérdida de amoníaco en forma gaseosa, repercutiendo estas pérdidas en el valor del fertilizante final del compost. Además, este amoníaco libre puede resultar tóxico para los microorganismos y para las plantas ya que es muy reactivo con un gran número de compuestos orgánicos. (Penélope, 2016).

Humedad: El agua constituye un papel primordial para la descomposición de la materia orgánica, puesto que es necesaria para una adecuada degradación de los desechos orgánicos dentro de la composta. El punto adecuado de humedad se encuentra entre aquellos valores en los que el agua no llegue a ocupar en su totalidad todos los poros disponibles de la composta, de manera que haya una adecuada aireación, así como otros gases que se generan a lo largo del proceso. (Innovatione Agro Food Design, 2021).

B.4) Etapas de compostaje

Las fases del compostaje son cuatro, sin embargo, puede haber una variación en función del procedimiento seleccionado y el tiempo que esta tarde.

1. Etapa mesófila.

La primera fase del compostaje recibe el nombre de “etapa mesófila”, en la cual, la materia orgánica está fresca y se encuentra a temperatura ambiente, razón por la cual la descomposición inicia de forma natural.

El material de partida inicia el proceso de compostaje a T_a (temperatura ambiente) y en pocos días o a veces horas, la temperatura llega hasta los 45°C , lo anterior debido a la actividad microbiana; en esta fase los microorganismos utilizan las fuentes de carbono y nitrógeno generando calor. La descomposición de compuestos solubles, como los azúcares, produce ácidos orgánicos, por lo tanto, el pH puede descender (con valores aproximados entre 4-4.5). Normalmente esta fase suele durar de 2-8 días. En esta etapa, el valor estimado de los parámetros es la siguiente:

Etapa Mesófila		
Temperatura	pH	Humedad
$T_a \leq T_c < 35-40^{\circ}\text{C}$	5-6.5	10-20%

*T.1 Intervalo de valores según los parámetros de control en la fase mesófila.
Elaboración propia con información obtenida de (Temperatura y pH en el proceso de compostaje | Productos para agricultura Hanna Instruments, s. f.)*

2. Etapa termófila o de higienización.

En esta segunda etapa, los microorganismos mesófilos son sustituidos por aquellos que soportan altas temperaturas, pues en esta fase se manejan temperaturas mayores a los 45°C , en su mayoría son bacterias termófilas, las cuales facilitan la degradación de fuentes más complejas de carbono (como la celulosa y la lignina).

Estos microorganismos actúan transformando el nitrógeno en amoníaco, por lo que el pH del medio suele aumentar. A partir de los 60°C aparecen las bacterias productoras de esporas y actinobacterias, las cuales son las responsables de descomponer las ceras, hemicelulosas y otros compuestos de carbono más complejos. Esta fase puede durar días o incluso meses, dependiendo de los materiales utilizados, condiciones climatológicas, monitoreo y el método a llevar a cabo. Gracias a las temperaturas alcanzadas en esta etapa, favorece la eliminación de algunos microorganismos patogénicos.

Resumen: En esta segunda etapa, las bacterias y hongos degradan la celulosa de los orgánicos y transforman el nitrógeno

en amoníaco, por consecuencia, la temperatura comienza a elevarse y por lo tanto, el pH también.

Etapa Termófila		
Temperatura	pH	Humedad
T _c ≤ 45-60°C	6-6.5	20-25%

*T.2 Intervalo de valores según los parámetros de control en la fase termófila.
Elaboración propia con información obtenida de (Temperatura y pH en el proceso de compostaje | Productos para agricultura Hanna Instruments, s. f.)*

3. Etapa mesófila II o de enfriamiento.

En esta fase del proceso, la composta vuelve a bajar su temperatura hasta alcanzar la temperatura ambiente, continúa la descomposición y los microorganismos se reactivan. En esta fase, el pH comúnmente continúa constante, a veces tiende a aumentar un poco más que en la etapa anterior.

Etapa de enfriamiento		
Temperatura	pH	Humedad
T _c = 35-40°C	6-6.5	25-30%

*T.3 Intervalo de valores según los parámetros de control en la fase de enfriamiento.
Elaboración propia con información obtenida de (Temperatura y pH en el proceso de compostaje | Productos para agricultura Hanna Instruments, s. f.)*

Dónde T_a corresponde a la temperatura ambiental y T_c a la T° de la composta.

4. Etapa de maduración.

Es la última fase del compostaje, se produce a temperatura ambiente y permite la consolidación de nuevas moléculas. El compost madura durante meses y suma nuevas poblaciones microbianas, así como grupos de organismos nuevos (como los anélidos, ácaros o insectos) que ayudan a completar la transformación del proceso.

En cuanto a la humedad que debe de tener el humus, idealmente debería de ser del 30-35 por ciento.

B.5) Técnicas de compostaje.

Los factores claves a la hora de decidir una técnica son:

- Tiempo de proceso.
- Requerimientos del espacio.
- Seguridad higiénica requerida.
- Material de partida (ausencia o presencia de material de origen animal).
- Condiciones climáticas del lugar (temperaturas bajo cero, vientos fuertes, lluvias torrenciales u otros fenómenos climáticos extremos).

Las diferentes técnicas se dividen generalmente en sistemas cerrados y sistemas abiertos. Los sistemas abiertos son aquellos que se hacen al aire libre, y los cerrados los que se hacen en recipientes o bajo techo.

Sistemas abiertos o en pilas

Cuando se cuenta con una gran cantidad de residuos orgánicos variados (arriba de 1m³ o superior), se puede llevar a cabo este tipo de compostaje.



Fig.4 Pilas de compostaje (sistemas abiertos) Fuente: M.A. Martínez. Directora planta de compostaje municipal, Nicaragua.

Dependiendo de cómo se manejan las pilas en la planta (tamaño, tecnología, tiempo de retención), se pueden elaborar de diferentes maneras; variando el volumen, la forma, la disposición y el espacio entre ellas.

En el documento titulado "*Métodos de compostaje en la finca*" (FAO, 2013) se describen varias técnicas de formación de pilas, como el método Indore de la India y el compostaje rural chino, todas las cuales implican la alternancia de capas de diversos materiales para lograr una relación C:N adecuada (30:1) y controlar la temperatura y la humedad.

En la industria, las pilas se tecnifican considerablemente, con métodos como:

La **aireación forzada**, que consiste en suministrar aire a través de canales contruidos en el suelo para mantener los niveles óptimos de oxígeno.

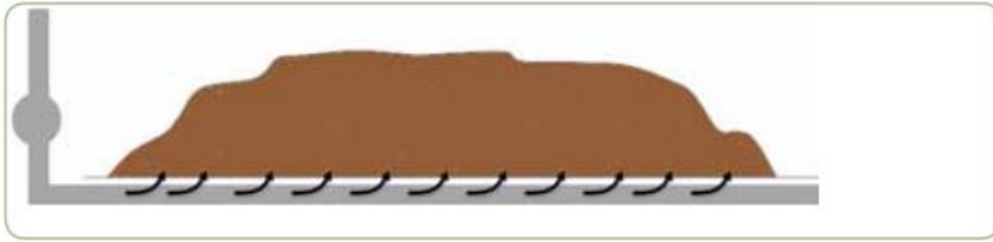


Fig.5 Sistema de aireación forzada. Fuente: FAO,2013.

Recolección de lixiviados para posteriormente darle el debido tratamiento.

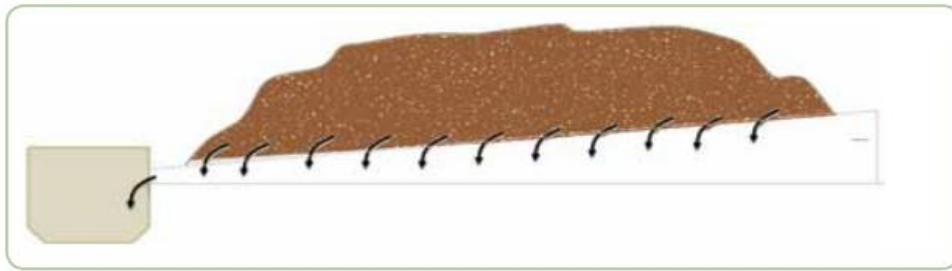


Fig.6 Sistema de recolección de lixiviados. Fuente: FAO,2013.

Sistema de pilas con volteo mecanizado

Ya sea utilizando un volteador lateral de tornillo adaptado a un tractor o una pala frontal, en el primer sistema mecanizado la altura de la pila varía con respecto a la del volteador lateral de tornillo, mientras que en el segundo sistema las pilas pueden llegar hasta los tres metros de altura.

En un entorno familiar, esta altura no es realista, siendo más conveniente una altura de 1,5 metros para facilitar el proceso de volteo.

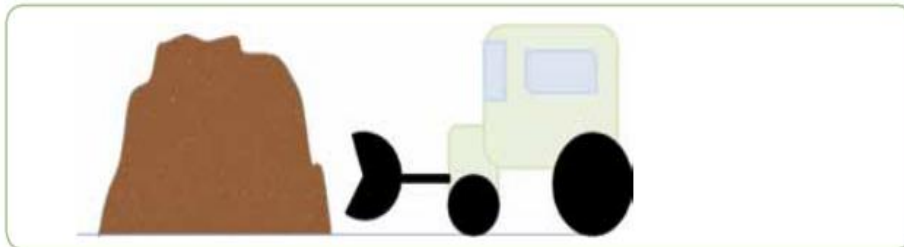


Fig.7 Sistema de pilas con volteo mecanizado. Fuente: FAO,2013.

Antes de iniciar el compostaje, es importante determinar el espacio y el volumen que se emplearán. Pueden existir diversas restricciones, como la cantidad de material a compostar, el tamaño del área donde se aplicará el compost, o el lugar donde se llevará a cabo el proceso de compostaje.

(FAO,2013)

Relación C:N en el compostaje

Durante el compostaje se lleva a cabo un proceso de descomposición de la materia orgánica empleada, por lo tanto, se debe de tener un control sobre la cantidad de materia orgánica utilizada ya que esto determinará cuánto carbono y nitrógeno producirá el proceso. El carbono se obtiene principalmente de

materiales como hojas secas, ramas, cartón, papel, paja, aserrín o restos secos de poda. Estos materiales son importantes para proporcionar estructura a la pila de compost, absorber el exceso de humedad y proporcionar carbono a los microorganismos descomponedores.

Por otro lado, el nitrógeno se obtiene de materiales como restos de alimentos, césped fresco, estiércol, restos de cultivos verdes o posos de café. Estos materiales son conocidos como "materiales verdes" y son fundamentales para proporcionar nutrientes a los microorganismos descomponedores y acelerar el proceso de descomposición de la materia orgánica. Es de suma importancia mantener un equilibrio entre los materiales ricos en carbono y los materiales ricos en nitrógeno para garantizar una descomposición eficiente y una óptima relación C/N en la pila de compost. Esto se logra mezclando adecuadamente los materiales marrones y verdes en la pila de compost antes de empezar el proceso de compostaje.

Nivel alto de nitrógeno 1:1-24:1		C:N equilibrado 25:1-40:1		Nivel alto de carbono 41:1-1000:1	
Material	C:N	Material	C:N	Material	C:N
Purines frescos	5	Estiércol vacuno	25:1	Hierba recién cortada	43:1
Gallinaza pura	7:1	Hojas de frijol	27:1	Hojas de árbol	47:1
Estiércol porcino	10:1	Crotalaria	27:1	Paja de caña de azúcar	49:1
Desperdicios de cocina	14:1	Estiércol ovino/caprino	32:1	Basura urbana fresca	61:1
Gallinaza camada	18:1	Hojas de plátano	32:1	Cascarilla de arroz	66:1
		Restos de hortalizas	37:1	Paja de arroz	77:1
		Hojas de café	38:1	Hierba seca (gramíneas)	81:1
		Restos de poda	44:1	Bagazo de caña de azúcar	104:1
		Pulpa de café	29:1	Mazorca de maíz	117:1
				Paja de maíz	312:1
				Aserrín	638:1

T.4 Relación C:N de algunos materiales usados en el compostaje. Elaboración propia con información obtenida y adaptada de PNUD-INFAT (2002).

La relación C/N óptima para iniciar el compostaje se sitúa entre 25:1 y 35:1.

Sistemas cerrados o en recipientes

La técnica del recipiente presenta una serie de características que promueven su reproducción: impide la acumulación de agua de lluvia, resguarda al material de vientos intensos, simplifica las labores de volteo, facilita la extracción de líquidos percolados (lixiviados), controla la entrada de vectores (como ratones y aves), y evita el acceso al material en descomposición por parte de personas no autorizadas y animales de la zona.

La principal desventaja de este método es que puede llegar a alcanzar altas temperaturas, por lo que resulta crucial mantener un control estricto de los parámetros. En climas calurosos, es común agregar tierra al contenedor (hasta un 10%) para regular la temperatura, dado que la tierra es un material estable que no produce calor.

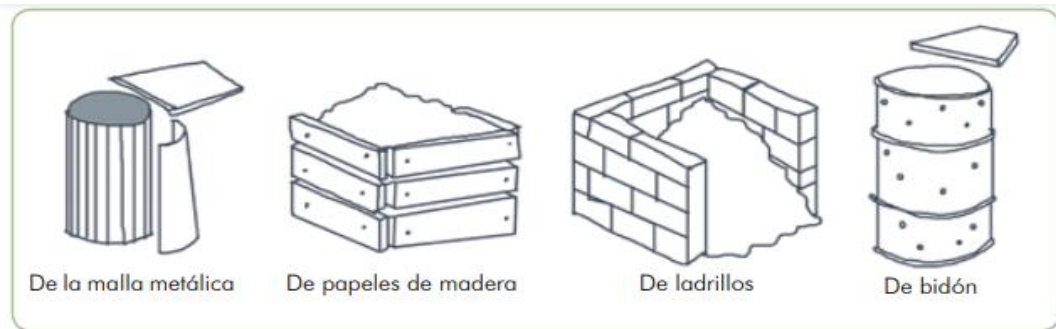


Fig.8 Tipos de recipientes usados como compostera. Fuente: A. Pantoja. CDC de Villanueva, Honduras.

Antes de iniciar el procedimiento, es fundamental seleccionar un contenedor apropiado, tomando en cuenta los diversos tipos de tambores disponibles en la zona, la cantidad de material orgánico a compostar, la ubicación donde se situará el recipiente (ya sea de manera horizontal o vertical) y el tipo de proceso (estático o dinámico, descripciones que se detallarán más adelante).

B.6) Actividades a realizar en el compostaje con recipientes

Elección de la ubicación y del tipo de contenedor de compostaje. Dependiendo del espacio disponible, la accesibilidad, la cantidad de material a compostar y el tiempo que se pueda dedicar al proceso de compostaje, se opta por una compostera vertical u horizontal. Es fundamental que el recipiente esté en un área de fácil acceso, preferiblemente cubierta y bien ventilada. El material orgánico debe estar picado en trozos de entre 5 y 20 cm para facilitar la descomposición.

Es necesario lograr una relación C/N de 25:1 a 35:1 para iniciar adecuadamente el proceso de compostaje. El contenedor se llena durante dos o tres semanas y luego se deja en reposo para que el compostaje se complete. Se debe controlar la humedad y garantizar una adecuada aireación, además de realizar volteos regulares, extraer el material compostado al final del proceso y tamizar si es necesario.

Las técnicas y conceptos aplicados en el compostaje en contenedores son similares a los utilizados en el compostaje en pilas. Se deben realizar tareas de forma cuidadosa para asegurar el éxito del proceso de compostaje.

C) Productos vinculados con el compost.

C.1) Vermicompost

El vermicompost es un proceso de compostaje que utiliza lombrices y microorganismos. A través de este proceso aeróbico, la materia orgánica se estabiliza.

A diferencia del compost maduro, en el vermicompost son las lombrices las encargadas de llevar a cabo el proceso con la ayuda de los microorganismos (Lazcano, 2008). Durante este procedimiento, minerales que son insolubles se vuelven solubles, lo que las plantas pueden absorber cuando se aplica el vermicompost al suelo. También se degradan compuestos orgánicos complejos, como la celulosa, a formas más simples gracias a las bacterias presentes en el tracto digestivo de las lombrices, lo que aumenta la disponibilidad de nitrógeno.

Para la producción de vermicompost, la especie de lombriz más utilizada comercialmente es la *Eisenia foetida*, conocida comúnmente como lombriz roja californiana, a pesar de ser originaria de Europa. Su nombre "foetida" se debe al olor de los exudados que emite, los cuales probablemente son una adaptación anti depredadora.

C.2) Té de compost

El té de compost es el extracto soluble en agua obtenido a partir del compost. Consiste en un método para extraer los compuestos solubles en agua y microorganismos del compost. Este procedimiento es similar al de hacer una infusión de hierbas o un té para beber, aunque utilizando agua fría que, aunque a simple vista luzca "limpia", no es necesariamente potable.

El objetivo del proceso de elaboración del té de compost es aumentar la cantidad de microorganismos en el mismo, para lo cual se pueden incorporar aditivos que actúan como catalizadores para acelerar el metabolismo microbiano y aumentar las poblaciones de manera más rápida y eficaz (Scheuerell, 2004; Angulo et al., 2011).

El té de compost debe diferenciarse de otros productos como el lixiviado de compost, el té de estiércol y el extracto de compost.

- El **lixiviado de compost** es el líquido que se desprende debido a la saturación de humedad en el material durante el proceso de compostaje el cual contiene nutrientes solubles y microorganismos.

Este exceso de agua se libera del compost y se puede recolectar. Sin embargo, si el compost tiene un exceso de agua y aún no ha madurado, pueden formarse áreas anaeróbicas donde se producen compuestos como azúcares que pueden generar ácidos y otros elementos tóxicos para las plantas (fitotóxicos). Cuando el lixiviado proviene de compost fresco, por lo general tiene un aspecto oscuro, un pH ácido y un olor desagradable.

- El **extracto de compost** es el resultado de filtrar agua a través del compost. Esta solución contiene nutrientes solubles y microorganismos, pero debido al breve tiempo de contacto del agua con el material, la cantidad recuperada es limitada. Algunos agricultores utilizan esta agua en las mismas pilas de compost para incrementar la presencia de microorganismos, aunque este proceso es costoso y en ocasiones el aumento no es significativo.
- **Té de estiércol:** El líquido obtenido del estiércol contiene nutrientes solubles como nitrógeno, fósforo y potasio, así como bacterias. Dependiendo de la madurez del estiércol, puede contener nitratos o amonio. Sin embargo, si no ha pasado por un proceso completo de maduración, también puede llevar elementos no deseados como antibióticos o residuos de medicamentos. Además, microbiológicamente puede contener patógenos como huevos y quistes de protozoarios y nematodos. La calidad del té de compost depende del compost utilizado.
- **Calidad del té de compost:** La calidad del té de compost está directamente relacionada con la calidad del compost del que provenga. Si el compost ha pasado por todas las etapas térmicas necesarias para alcanzar la madurez, es más probable que se hayan eliminado patógenos, semillas, nematodos y otros microorganismos dañinos. Sin embargo, si el proceso de compostaje no ha alcanzado la temperatura y tiempo adecuados, o si los materiales están en estado crudo, existe un alto riesgo de encontrar bacterias como *Salmonella* spp., *E. coli* y *Clostridium* spp., así como virus como Enterovirus, Hepatitis A y Adenovirus, y parásitos como *Taenia* sp. y *Ascaris lumbricoides*, los cuales pueden causar problemas de salud tanto en los agricultores como en los consumidores, por lo tanto, es crucial tomar medidas de seguridad antes de aplicar el té de compost. (FAO, 2013).

D) Producción de energía a partir de la biomasa.

La biomasa comprende la materia orgánica presente en diferentes tipos de residuos, tales como residuos agrícolas, forestales, agroalimentarios (subproductos y desechos de la industria alimentaria y ganadera), así como en los desechos generados en áreas urbanas.

La materia orgánica puede ser procesada para convertirse en bioenergía (electricidad, calor, biometano y biocarburantes) y en productos naturales de alto valor para diversas industrias como la alimentaria, la petroquímica y la cosmética. La biomasa como fuente de energía eléctrica a gran escala presenta un factor de constancia importante a considerar, ya que a diferencia de otras fuentes renovables que dependen de la disponibilidad de sol o viento, la biomasa

puede generar electricidad de forma continua, lo que la convierte en una fuente de energía valiosa para garantizar un sistema eléctrico fiable y flexible en todo momento.

En términos de beneficios ambientales, se destaca la capacidad de convertir residuos, que suelen ser fuentes de emisiones, plagas o incendios, en recursos energéticos y bioproductos.

La valorización de desechos industriales permite cerrar ciclos de producción, favoreciendo así la economía circular, reduciendo los impactos ambientales negativos y promoviendo un uso más eficiente de los recursos. Por ejemplo, las cenizas pueden utilizarse como fertilizantes en la agricultura. En cuanto a las ventajas socioeconómicas, se menciona la generación de empleo tanto en la obtención de biomasa como en las operaciones y mantenimiento de las instalaciones. (Communications, 2023)

D.1) Propiedades fisicoquímicas de las frutas y verduras.

Las hortalizas, las verduras y las frutas, constituyen el grupo de alimentos que más aportan a la función reguladora del cuerpo humano, principalmente por la cantidad de vitaminas, minerales y agua que contienen, por lo cual, son imprescindibles para llevar una buena salud. (Manual de frutas y hortalizas, 2019).

D.2) Composición química

Agua: Contienen entre el 75-90%.

Proteínas

Las proteínas, se presentan en niveles reducidos; por ejemplo, en el caso de las frutas, la cantidad varía aproximadamente de 0,1 a 1,5%, por lo que, en términos nutricionales, las frutas presentan un valor proteico bajo.

En verduras, este porcentaje fluctúa entre 1 y 5%, siendo principalmente enzimas que intervienen en la creación de aromas característicos, así como en la generación de aromas indeseados, cambios en los tejidos y variaciones en el color.

Vitaminas y minerales

En los vegetales predominan el potasio (K), calcio (Ca), sodio (Na) y magnesio (Mg); sin embargo, la absorción de hierro es mucho menor en comparación con las carnes. Las vitaminas varían ampliamente según la especie y las condiciones

climáticas, destacando la vitamina C y las del complejo B, a excepción de la B12. Algunos vegetales también contienen vitaminas E y K.

Por otro lado, las frutas contienen carotenos precursores de la vitamina A, así como una alta concentración de vitaminas del complejo B y vitamina C. Existen múltiples factores que influyen en la composición vitamínica de las frutas y verduras, siendo la cantidad de luz solar que reciben uno de los más importantes; por ejemplo, los frutos expuestos a mayor luz solar suelen ser más ricos en vitaminas que aquellos en zonas menos iluminadas. Se recomienda consumir la pulpa más externa de las frutas, justo debajo de la piel, ya que es donde se concentran la mayoría de las vitaminas y nutrientes, por lo que se aconseja no pelarlas o realizar un pelado superficial.

Hidratos de carbono

En el caso de las verduras, los niveles de proteína varían entre el 3 y el 20%, mientras que en las frutas oscilan entre el 5 y el 18%.

En las verduras, los principales polisacáridos presentes son el almidón, la celulosa, la hemicelulosa y la pectina, los cuales influyen en su sabor menos dulce y en su consistencia más firme en comparación con las frutas. Por otro lado, en las frutas predominan los azúcares simples como la sacarosa, la glucosa y la fructosa. En ciertas frutas, como las ciruelas y peras, también se encuentran azúcares-alcohol como el sorbitol, que tienen propiedades laxantes.

Es importante destacar que las frutas no maduras contienen almidón, pero a medida que maduran, la concentración de almidón disminuye hasta casi desaparecer por completo.

Grasas

Tanto en verduras y hortalizas como en frutas, el contenido de grasas es prácticamente nulo, variando entre el 0,1% y el 0,9% en las verduras y hortalizas, y entre el 0,1% y el 0,5% en las frutas.

En las frutas, se encuentran ácidos grasos como el palmítico, el oléico y el linoleico, así como ceras que recubren la piel de ciertas frutas, especialmente las manzanas. Estas ceras juegan un papel importante en la regulación de la humedad de los tejidos, además de actuar como protección contra hongos, insectos y bacterias.

Fitoquímicos

Son compuestos bioactivos que tienen efectos positivos en el cuerpo y que se encuentran en las plantas.

Algunos de los fitoquímicos más destacados incluyen *carotenoides*, *polifenoles*, *glucosinolatos*, *fitoesteroles*, *índoles* y *terpenos*. Muchos de estos compuestos actúan como antioxidantes naturales.

D.3) Relación con la producción de energía eléctrica

Las frutas y verduras son alimentos que contienen agua, minerales y compuestos orgánicos que pueden mostrar algunas propiedades eléctricas. A continuación, se enumeran algunas propiedades eléctricas de las frutas y verduras:

1. Conductividad eléctrica: Las frutas y verduras son en su mayoría alimentos conductores de electricidad debido a la presencia de agua y minerales en su composición. Esta conductividad eléctrica puede variar según el contenido de agua y minerales de cada fruta o verdura.

2. Capacitancia: Debido a su composición y estructura celular, pueden actuar como capacitores eléctricos, es decir, pueden almacenar energía eléctrica de forma temporal.

3. Potencial eléctrico: Algunas frutas y verduras pueden generar un potencial eléctrico debido a reacciones químicas que ocurren en su interior. Por ejemplo, en el caso de las papas, se han utilizado para generar energía eléctrica a través de celdas galvánicas.

4. Resistencia eléctrica: Ciertas frutas y verduras pueden llegar presentar resistencia eléctrica, es decir, pueden dificultar el paso de la corriente eléctrica a través de ellas. Esta resistencia puede estar relacionada con la presencia de compuestos orgánicos en su composición.

En resumen, las frutas y verduras pueden presentar algunas propiedades eléctricas debido a su composición química y estructura celular. Estas propiedades pueden variar según el tipo de fruta o verdura y pueden ser objeto de estudio en diferentes campos, como la electroquímica y la bionanotecnología. (Gutiérrez, L. F. M., Caicedo, J. C., & Díaz, F. O. 2019).

D.4) Alimentos capaces de generar electricidad

Las frutas y verduras no solo son ricas en nutrientes esenciales para la salud, sino que también contienen una gran cantidad de agua que facilita la conducción de electricidad. Algunos ingredientes como el ácido cítrico o el ácido ascórbico aumentan la conductividad, pudiendo incluso generar un voltaje lo suficientemente fuerte para funcionar como una pequeña batería. Algunas frutas y verduras, especialmente aquellas con altos niveles de iones superconductores

como el sodio o el potasio, pueden actuar como conductores de energía al crear un circuito iónico a través de los electrolitos presentes en el agua.

Los alimentos cítricos como naranjas y limones son excelentes conductores de electricidad debido a su acidez, que actúa como un electrolito. Por otro lado, las manzanas pueden ser utilizadas para generar electricidad a través de un proceso menos contaminante y económico, convirtiendo la pulpa en electrodos.

Un experimento reciente ha demostrado que los residuos de piña pueden generar electricidad a partir del gas metano que producen. Las patatas también pueden generar electricidad debido a la acidez del ácido ascórbico y la presencia de metales conductores en su interior. Otros vegetales como tomates, zanahorias, cebollas, batatas y pepinos, que contienen potasio y iones, también pueden conducir la electricidad. Incluso los alimentos encurtidos, como los pepinillos, son buenos conductores de electricidad debido a su alto contenido de sal, que es rico en iones. En general, los alimentos con alto contenido de sal son buenos conductores de electricidad. (RTVE.es, 2020)

E) Métodos de obtención de energía a partir de la biomasa.

1. Gasificación: Proceso en el cual la biomasa se convierte en gas mediante la reacción química con oxígeno a altas temperaturas. El gas resultante (llamado gas de síntesis) se puede utilizar como combustible en motores de combustión interna para generar electricidad.

2. Pirólisis: Descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno para producir biocarbón, bioaceites y biogás. Estos subproductos se pueden utilizar como combustibles o materias primas para la producción de energía.

3. Fermentación: Proceso en el cual la biomasa se descompone por acción de microorganismos para producir biogás, que es una mezcla de metano y dióxido de carbono. Este biogás se puede utilizar como combustible en motores de combustión o como fuente de calor en calderas.

4. Digestión anaeróbica: Proceso biológico en el cual microorganismos descomponen la biomasa en ausencia de oxígeno para producir biogás. Este biogás se puede utilizar como combustible para generadores de electricidad.

5. Combustión directa: Proceso en el cual la biomasa se quema directamente para producir calor, que se puede utilizar para generar vapor y luego electricidad a través de turbinas de vapor.

Estos son solo algunos de los métodos de obtención de energía a partir de la biomasa, existen muchos otros procesos y tecnologías en desarrollo que permiten aprovechar de manera más eficiente este recurso renovable.

E.1) Sistemas bioelectroquímicos (SBE) y su función

En 1911, Potter publicó: "La desintegración de compuestos orgánicos por acción de microorganismos está acompañada por la liberación de energía eléctrica". Sin embargo, no fue hasta 1960 que se creó la primera celda de combustible microbiana que aprovechaba esta capacidad microbiana (Berk y Canfield, 1964). Desde entonces, el término celda de combustible microbiana se ha utilizado para describir numerosos sistemas electroquímicos que utilizan microorganismos para producir electricidad (Ieropoulos y col.,2005 b; Logan, 2008).

En los últimos años, se ha progresado en la utilización de microorganismos para llevar a cabo procesos de conversión de energía y eliminación de compuestos, lo que ha posibilitado el desarrollo de los SBE. (Tremblay y Zhang,2015).

Estas nuevas tecnologías se basan en la capacidad de ciertos microorganismos para catalizar reacciones de oxidación en el ánodo y/o reacciones de oxidación y reducción en el cátodo (El Mekawy y col.,2015). Dependiendo de cómo opera el reactor y del producto final obtenido, los SBE se pueden clasificar en tres categorías principales: celdas de combustible microbiana (CCM), celdas de electrólisis microbiana (CEM) y celdas de desalinización microbiana (CDM) (Pant y col., 2012).

Nombre	Abreviatura	Función	Descripción	Referencias
Celda de combustible microbiana	CCM	Convertir el sustrato directamente a electricidad.	La oxidación de la materia orgánica tiene lugar en el ánodo y los electrones son conducidos al cátodo a través de un circuito externo.	Rabaey y Verstrate, 2005; Logan y col.,2006.
Celdas de remediación microbiana	CRM	Remediar los contaminantes subterráneos.	Es una CCM donde se utilizan los electrodos	Huang y col., 2011 b

			como aceptores (ánodo) o donantes (cátodo) de electrones.	
Celdas solares microbianas	CSM	Integrar la reacción fotosintética con la producción de electricidad microbiana.	Es una CCM que utiliza las relaciones sinérgicas entre la fotosíntesis y los organismos de las bacterias activas.	Strik y col., 2011
Celda de desalinización microbiana	CDM	Convertir un sustrato biodegradable directamente a electricidad y conducir la desalinización del agua.	Incluye cámaras adicionales entre el ánodo y el cátodo.	Cao y col., 2009; Kim y col., 2011; Ismail e Ibrahim, 2015.
Celda de electrólisis microbiana	CEM	Generar hidrógeno y/o reducir metales pesados añadiendo energía eléctrica al sistema.	La producción de hidrógeno se lleva a cabo en el cátodo.	Call y col., 2009; Rabaey y Rozenda I, 2010.

T.5 Sistemas bioelectroquímicos, (de elaboración propia con información obtenida de las fuentes mencionadas).

E.2) Celdas combustibles microbianas

¿Qué son?

Las celdas de combustible microbianas (CCM) utilizan microorganismos especializados, conocidos como exo electrógenos, para convertir combustibles biodegradables en electricidad.

¿Cómo funcionan?

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química intrínseca en energía eléctrica en lugar de la generación directa de calor. Las CCM pueden, en principio, procesar una amplia variedad de combustibles, aunque los más interesantes hoy en día son los combustibles comunes, como el gas natural (y sus derivados). Se puede utilizar una amplia gama de oxidantes, pero la mayoría de las celdas de combustible utilizan aire como oxidante.

Las CCM prometen generación de energía con alta eficiencia (eficiencia eléctrica > 60%) ya que no están restringidas por las limitaciones termodinámicas de los motores de calor convencionales (como se define por la eficiencia de Carnot).

Tienen un bajo impacto ambiental porque se evita la combustión, minimizando así los contaminantes.

Un atractivo de una celda de combustible es que, a diferencia de una batería, puede funcionar continuamente siempre que el agente reductor (combustible) y el oxidante (oxígeno) se repongan continuamente. En una celda de combustible típica, el combustible se alimenta continuamente al ánodo (electrodo negativo) y un oxidante (a menudo oxígeno en el aire) se alimenta continuamente al cátodo (electrodo positivo). Las reacciones electroquímicas tienen lugar en los electrodos para producir una corriente eléctrica a través del electrolito, mientras se impulsa una corriente eléctrica complementaria que realiza trabajo en la carga. (Scott, K. 2014)

F) Circuitos eléctricos

F.1) ¿Qué son?

Un circuito eléctrico es un conjunto de componentes eléctricos interconectados que posibilitan la generación, conducción y aplicación de energía eléctrica con el propósito de convertirla en diferentes formas de energía, como calor (estufa), luz (bombilla) o movimiento mecánico (motor).

Los componentes utilizados en un circuito eléctrico para lograr esta función son los siguientes:

Generador: Parte del circuito donde se produce la electricidad, creando una diferencia de tensión entre sus extremos.

Conductor: Cable por donde se desplazan los electrones impulsados por el generador.

Resistencia eléctrica: Elementos del circuito que obstaculizan el flujo de corriente eléctrica.

Interruptor: Dispositivo que posibilita abrir o cerrar la circulación de la corriente eléctrica. Cuando el interruptor está abierto, los electrones no se desplazan; si está cerrado, permiten su paso. (Circuitos Eléctricos, s. f.)

F.2) Resistencias de los conductores eléctricos

La resistencia es la dificultad que enfrenta la corriente eléctrica al pasar a través de los materiales, y esta dificultad depende de tres factores:

1. El tipo de material, ya que cada material tiene una resistencia específica y propiedades distintas en términos de conductividad. Esta resistencia se conoce como resistividad [ρ] y tiene un valor constante expresado en ohmios por metro ($\Omega \cdot m$).
2. La longitud del conductor, donde a mayor longitud, mayor será la resistencia ofrecida. Se mide en metros (m).
3. La sección transversal del conductor, donde a mayor área transversal, menor será la resistencia. Se mide en metros cuadrados (m^2).

La resistencia de un conductor se expresa en ohmios (Ω) y puede calcularse mediante la fórmula:

$$R = \rho \cdot l / s \qquad \text{ec. 1}$$

F.3) Condensadores en los circuitos

En los circuitos eléctricos se emplean tres tipos de fuentes: fuente de corriente, fuente de corriente alterna (CA) y fuente de corriente continua (CC).

Una fuente de corriente es un dispositivo electrónico que suministra o absorbe electricidad.

Existen dos tipos de fuentes de corriente: independiente y dependiente.

Mientras que una fuente de corriente independiente produce una corriente constante, una fuente de corriente dependiente genera una corriente proporcional a otra tensión o corriente presente en el circuito.

Por otro lado, una fuente de corriente alterna es un mecanismo capaz de suministrar potencia y frecuencia alternas a una carga. La representación gráfica de una fuente de CA se asemeja a una onda sinusoidal, donde la amplitud corresponde a la tensión máxima en voltios y la frecuencia se expresa en períodos por segundo.

Finalmente, una fuente de corriente continua es un dispositivo que proporciona corrientes y tensiones constantes al circuito. Estas fuentes son las más básicas y comúnmente utilizadas en ejercicios matemáticos escolares.

F.4) Tipos de circuitos eléctricos

Existen cinco tipos fundamentales de circuitos: circuito cerrado, circuito abierto, cortocircuito, circuito en serie y circuito en paralelo, cada uno diseñado para permitir el flujo de corriente al crear un camino conductor.

En un circuito abierto, la corriente no circula ya que la continuidad del circuito está interrumpida, lo que impide el flujo de electricidad.

Un circuito abierto se caracteriza por no permitir el paso de la corriente cuando se presenta una diferencia de potencial, y su resistencia es infinita.

Por otro lado, un circuito cerrado es una conexión eléctrica completa por la que la corriente fluye de manera continua. Se forma un circuito cerrado al conectar una serie de cables eléctricos entre sí, lo que permite que la electricidad se desplace de un extremo a otro de dicho circuito.

Un cortocircuito consiste en una conexión errónea entre dos nodos con tensiones que se supone deben ser diferentes, pero que en realidad son iguales. En un cortocircuito ideal, no existe resistencia ni caída de voltaje a través de la conexión. En la práctica, un cortocircuito resulta en una conexión prácticamente sin resistencia, lo que provoca que toda la corriente circule a través del cortocircuito, generando niveles excesivos de corriente que pueden llegar a quemar el cable conductor. (Circuitos Eléctricos: Símbolos, Tipos y Elementos | Study Smarter, s. f.)

F.5) Circuito en serie

¿Qué es?

Se define un circuito en serie como aquel que cuenta con múltiples resistencias, pero solo dispone de un camino por el cual pueden fluir los electrones. Desde un extremo del circuito, los electrones avanzan a través de un único camino sin divisiones, pasando por las resistencias hasta llegar al otro extremo. Todos los componentes de un circuito en serie están conectados de un extremo al otro de manera consecutiva.

En un circuito en serie, dado que la corriente solo puede seguir una ruta específica, todos los componentes reciben la misma corriente que fluye a través de ellos, de manera uniforme en todo el circuito. Este es un aspecto fundamental del funcionamiento de un circuito en serie.

Características

Se pueden resaltar tres características principales de los circuitos eléctricos:

- **Corriente:** En un circuito en serie, la corriente que circula a través de cada componente es la misma.
- **Resistencia:** La resistencia total de un circuito en serie es igual a la suma de las resistencias individuales.

- **Tensión:** La tensión total en un circuito en serie es igual a la suma de las tensiones en cada uno de los elementos conectados en serie.

Algunas otras características son:

- En un circuito en serie, la electricidad fluye por una sola ruta. Dado que la corriente es constante en todo el circuito, la cantidad de voltaje utilizado por cada carga varía según la resistencia de la carga.
- La carga con mayor resistencia consume más voltaje.
- Si se produce una interrupción en cualquier punto del circuito, como una bombilla quemada, el funcionamiento de todo el circuito se verá afectado.

Elementos de un circuito en serie

Los componentes de un circuito eléctrico en serie son los siguientes:

1. Una **fuerza de energía eléctrica**, que es el punto de origen de la energía transmitida a través del conductor.
2. **Resistencias**, que son dispositivos conectados a la red eléctrica y que reciben la corriente para transformarla en diferentes formas de energía, como lumínica en el caso de bombillas o cinética en el caso de motores.
3. **Conductores ideales**, generalmente fabricados de un material metálico como el cobre, que se extienden desde la fuente hasta las resistencias y viceversa, permitiendo el flujo de electrones, es decir, la electricidad. (JL, 2023).

Para este proyecto, se utilizó un circuito en serie y también bobinas como los electrodos del sistema. La bobina, de acuerdo con la teoría mencionada anteriormente, produce un campo electromagnético gracias al núcleo ferroso (en este caso el tornillo) y el alambre de cobre envuelto en él, esto provoca que la mayor parte de la energía eléctrica generada en la unidad experimental vaya directamente a las terminales de la bobina, recorre el circuito en serie del lote y finalmente se reserva en el capacitor.

G) Métodos estadísticos

Para la obtención de una correlación que vincule todos los parámetros de control del proyecto (temperatura, pH, humedad, voltaje, etc.) para lo cual se empleó el coeficiente de correlación de Pearson.

G.1) Coeficiente de correlación de Pearson

La correlación es una métrica que mide la relación lineal entre dos variables cuantitativas continuas. Para determinar si dos variables están correlacionadas, es importante verificar si varían conjuntamente. Es importante destacar que la covariación no implica necesariamente causalidad, y la correlación puede ser simplemente fortuita.

En esencia, la correlación es una medida normalizada de la asociación lineal entre dos variables. Esta medida, conocida como índice de correlación (r), puede variar entre -1 y +1, ambos extremos indicando correlaciones perfectas, positiva y negativa respectivamente. Un valor de $r = 0$ indica la ausencia de relación lineal entre las variables. Una correlación positiva indica que las variables varían en el mismo sentido, mientras que una correlación negativa indica que varían en sentidos opuestos. (Pablo Vinuesa, CCG-UNAM. <http://www.ccg.unam.mx/~vinuesa/>, s. f.)

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x * \sigma_y}$$

Ecuación del coeficiente de correlación de Pearson. Elaboración propia con información recuperada de: (Píldoras matemáticas, 2019).

Dónde:

r = Coeficiente de correlación de Pearson.

σ_{xy} =Covarianza.

σ_x = Desviación típica de x.

σ_y = Desviación típica de y.

G.2) Análisis de varianza (ANOVA)

El análisis de varianza de un factor (ANOVA) es una herramienta estadística que se utiliza para analizar la relación entre una variable dependiente cuantitativa y una variable de factor única. Al aplicar este procedimiento, se estima el tamaño de efecto y se evalúa la hipótesis de que varias medias son iguales. El ANOVA es, en esencia, una extensión de la prueba para dos muestras. Además de

detectar diferencias entre las medias, es posible identificar qué medias específicas difieren.

Existen dos tipos de contrastes para lograr esto: a priori y post hoc. Los contrastes a priori se establecen antes de ejecutar el experimento, mientras que los contrastes post hoc se realizan después de haber concluido el experimento.

También se pueden utilizar para contrastar tendencias existentes en diferentes categorías. (*ANOVA de un Factor*, s. f.)

Marco Legal

Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética-La ley presente es de aplicación obligatoria en todo el territorio mexicano; tiene como objetivo regular el uso de energías renovables y tecnologías limpias para la generación de electricidad con distintos usos al suministro público de energía eléctrica, además de establecer la estrategia nacional y los mecanismos de financiación para la transición energética.

Para esta investigación se tomó en cuenta el artículo 3ro, ubicado en el capítulo 1 de la ley, el cual señala que las energías renovables son todas aquellas que provienen de fenómenos de la naturaleza y se pueden transformar en energía utilizada por las personas, se regeneran de forma natural y están disponibles de manera constante o recurrente.

En el caso de las CCMs estos “fenómenos de la naturaleza” mencionados en la ley, serían las rutas metabólicas que generan los mismos microorganismos del bioproceso. Por lo tanto, es susceptible considerar este punto para este proyecto, ya que tanto la elaboración de las CCMs como la generación de energía eléctrica, son considerados como un proceso de energía renovable. (SEMARNAT, 2018)

Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos- Esta ley tiene como objeto garantizar el derecho de todas las personas a un ambiente sano, promoviendo el desarrollo sustentable a través de medidas como la prevención, valorización y gestión integral de residuos peligrosos, residuos sólidos urbanos y residuos de manejo especial.

En los artículos 1ro y 2do de la ley, mencionan puntos que cumplen con la naturaleza de la investigación los cuales son:

Artículo 1ro:

VII.

VII. Fomentar la valorización de residuos, así como el desarrollo de mercados de subproductos, bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica y económica, y esquemas de financiamiento adecuados.

XII.

XII. Fortalecer la investigación y desarrollo científico, así como la innovación tecnológica, para reducir la generación de residuos y diseñar alternativas para su tratamiento, orientadas a procesos productivos más limpios.

Artículo 2do:

I.

El derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar.

II.

Sujetar las actividades relacionadas con la generación y manejo integral de los residuos a las modalidades que dicte el orden e interés público para el logro del desarrollo nacional sustentable.

VI.

La valorización de los residuos para su aprovechamiento como insumos en las actividades productivas.

(SEMARNAT, 2015)

NMX-AA-180-SCFI-2018: Esta norma establece los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como la información comercial y de sus parámetros de calidad de los productos finales.

La NMX-180 proporciona la información necesaria para guiar al lector hacia una técnica correcta en la realización del compostaje, la cual va desde los conceptos básicos (composta, compostaje, etapas del proceso, etc.) hasta los intervalos de los parámetros de control, como son el pH, humedad, temperatura, etc.

En el caso de este proyecto, para la construcción de nuestras CCMs, se tomó como materia prima la biomasa (residuos orgánicos) para llevar a cabo el proceso de compostaje. Cabe resaltar que las compostas fueron a microescala, por ende, se adaptó en función de las indicaciones y señalamientos que menciona la norma. (SEMARNAT, 2018)

Ley de bioseguridad de organismos genéticamente modificados

La presente ley tiene como objetivo principal regular y controlar las actividades relacionadas con la utilización y manipulación de organismos genéticamente modificados, con el fin de proteger la salud humana, el medio ambiente y la biodiversidad. Esto se logrará a través de la regulación de la confinada, liberación experimental, liberación en programa piloto, liberación comercial, comercialización, importación y exportación de estos organismos. De esta manera, se evitarán o reducirán los posibles riesgos que estas actividades pudieran causar y se garantizará un uso responsable y seguro de la biotecnología.

Para su aplicación en este proyecto, se tomó en cuenta el siguiente apartado:

- **Artículo 12:** Corresponde a la SAGARPA el ejercicio de las facultades que le confiere esta Ley, cuando se trate de actividades con OGMs, en este caso; refiriéndose al apartado VI del artículo, el cual dice lo siguiente: “OGMs que sean hongos, bacterias, protozoarios, virus, viroides, espiroplasmas, fitoplasmas, y otros microorganismos, que tengan fines productivos agrícolas, pecuarios, acuícolas o fitozoosanitarios”. (PROFEPA, 2022)

METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación tiene como enfoque principal el análisis del rendimiento energético producido por las CCMs, con la finalidad de demostrar que es posible obtener energía eléctrica limpia a partir de bioprocesos de compostaje aerobio/anaerobio aplicados y además, mitigar la contaminación por desechos orgánicos.

1.1 Diseño

El diseño de esta investigación se llevó a cabo de manera experimental, ya que durante el proceso se construyeron unidades por lotes (con 3 repeticiones) para evaluar el comportamiento del bioproceso del compostaje y el efecto de la inoculación bacteriana mediante la medición y monitoreo de los parámetros de control (pH, temperatura y humedad).

Se tuvieron 6 tratamientos correspondientes al número de cepas y tipo de sustrato y dos tratamientos de control en el experimento, uno para cada tipo de sustrato. Las unidades experimentales consistieron en una mezcla de residuos orgánicos, sustrato comercial y cepas, y residuos orgánicos y sustrato comercial como testigos; con el testigo se evaluó las condiciones sin inóculo bacteriano.

Esta investigación se determina del tipo cuantitativa/cualitativa-experimental, ya que utiliza métodos cuantitativos de recolección y análisis de datos, de manera objetiva con una medición controlada y continua. Por otro lado, es cualitativo, debido a que se tomaron en cuenta características como la textura, el color, el olor, entre otros.

1.2 Construcción de las celdas combustibles microbianas (CCMs)

Para la construcción y el estudio de las CCMs se llevaron a cabo las siguientes etapas:

1. Crecimiento y masificación de tres cepas bacterianas.
2. Armado de compostas a base de la selección de residuos orgánicos (frutas, verduras y hortalizas).
3. Adición de inóculos a las CCMs.
4. Selección y construcción del circuito eléctrico.

Con lo investigado previamente acerca de las CCMs, se determinó como una opción viable para recuperar la energía eléctrica generada por el proceso de degradación llevado a cabo en las compostas, por lo que se procedió a elegir el método de obtención de energía, proponiéndole un diseño específico de CCM, el cual consistió en un circuito eléctrico en serie adaptado a las bobinas, las cuales tendrían por función ser los electrodos (ánodo y cátodo) de cada celda.

Se utilizaron botes de plástico con 1 litro de capacidad para las CCMs. Los seis primeros lotes de tratamientos fueron una mezcla de sustrato comercial Garden's® seguido de una capa de residuos orgánicos (frutas, verduras u hortalizas) según el caso y los últimos 2 lotes sólo de sustrato comercial Garden's® y la capa de residuos orgánicos (frutas, verduras u hortalizas) según el caso, la hidratación de cada unidad experimental fue de 3 mL con agua potable, sin embargo, esta fue omitida después de la 3era semana, ya que al estar sometidas en condiciones anaerobias, la humedad que se produjo por el bioproceso no se liberó, por lo cual se condensó en la tapa y cayó nuevamente a la composta.

1. Crecimiento y masificación de las cepas bacterianas

Dada la naturaleza del proceso que realiza una composta de sustratos orgánicos (fruta y verdura) , se decidió realizar este proceso con la asistencia adicional de bacterias, las cuales se agregaron a las unidades experimentales a través de inóculos.

Se emplearon tres cepas microbianas las cuales fueron clasificadas previamente por un estudio de caracterización como *promotoras del crecimiento vegetal* (BPCV), correspondientes a la cepas 180 y 190, las cuales se crecieron masivamente en Caldo Luria Bertani (LB); mientras que la cepa 196 creció masivamente en caldo Rojo Congo, la cual se tuvo en incubación a 30°C durante 48 horas.

Posteriormente, las cepas bacterianas se separaron por centrifugación a 8000 rpm durante 20 minutos para continuar realizando un ajuste con buffer de fosfatos 0.1 M (pH 7.4) a 0.5Å equivalente a 1×10^9 UFC/mL (Mendoza-Hernández et al. 2019).

Estas cepas bacterianas actuaron como un biocatalizador, ya que además de incrementar la velocidad del proceso, también produjo un aumento de microorganismos generados durante el mismo, por lo tanto, la producción energética sería mucho mayor.

2. Armado de composta a base de la selección de residuos orgánicos (frutas, verduras y hortalizas)

Para la realización de las compostas, se eligieron previamente desechos orgánicos específicos de frutas y verduras.

La selección de dichos residuos (frutas y verduras) se hizo con base a sus características bioquímicas, ya que el proyecto busca aprovechar la producción de energía eléctrica que éstos generen, por lo tanto, fue necesario asegurar que las propiedades bioquímicas estuvieran relacionadas con la producción de energía eléctrica en función a su composición.

Dentro de la selección se encuentran los siguientes desechos orgánicos:

Residuos de frutas	Residuos de verduras
Plátano	Papa
Manzana	Camote
Papaya	Zanahoria
Pepino	Cebolla
Mango	Jitomate
	Espinaca

Tabla 6. Selección de los residuos orgánicos para las CCMs. Elaboración propia con datos experimentales.



Fig.9 Parte de la materia prima utilizada para la conformación de las compostas.

Para el tratamiento de los residuos orgánicos y la construcción de las compostas, se siguieron los señalamientos de la NMX-AA-180-SCFI-2018 adaptada al proyecto, ya que se realizó en microescala.

Se utilizaron recipientes de 1 L para cada lote de CCMs correspondiente al número de cepa, así como el tipo de desecho orgánico empleado; para el armado de las capas de la composta, como se mencionó anteriormente, las proporciones fueron adaptadas de acuerdo con el volumen del recipiente de contención, quedando conformadas en el siguiente orden:

- Hojarasca
- Sustrato comercial Garden's®
- Residuos orgánicos (frutas y verduras)
- Capa triturada de cascarón de huevo.
- Sustrato comercial Garden's®

Previo a la colocación de las capas, se realizó el triturado (en el caso de los residuos orgánicos, la hojarasca y los cascarones de huevo) adecuado para facilitar la degradación de los residuos orgánicos y el proceso tuviera un periodo de tiempo más corto. Posteriormente, se rotuló cada recipiente según el lote al que correspondiera y, recordando que es un proceso anaerobio, se taparon, restringiendo así, el proceso de transferencia de oxígeno entre la celda y el aire.

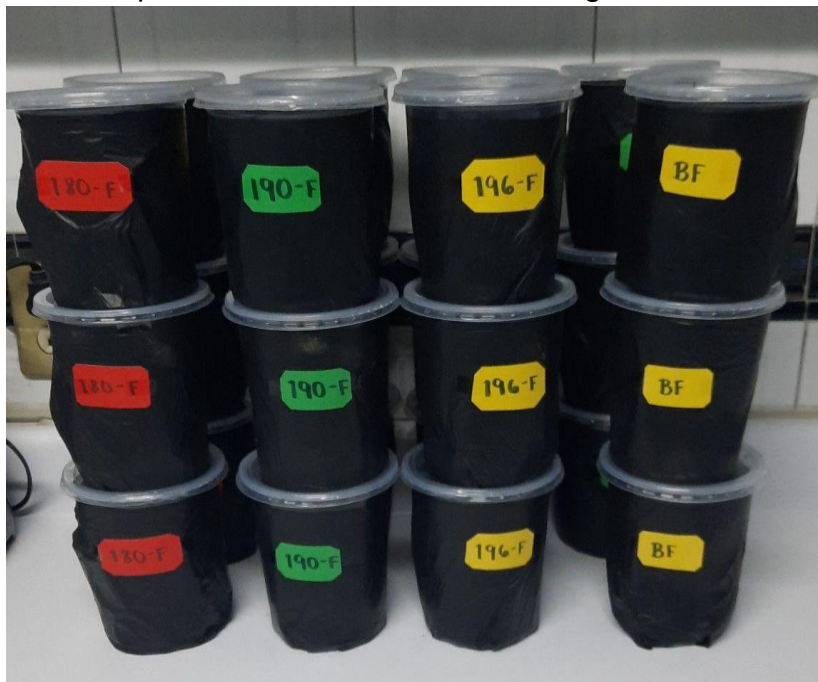


Fig.10 Unidades experimentales rotuladas en función del número de cepa y el tipo de residuo.

3. Adición de inóculos a las CCMs.

Una vez listas las unidades experimentales, se procedió a adicionar uniformemente 5 ml de inóculo en las unidades que corresponden en función del número de cepa y tipo de sustrato.



Fig.11 Adición de inóculos bacterianos correspondientes a cada unidad.

El procedimiento de agregación de los inóculos se hizo tomando en cuenta las medidas de seguridad mencionadas en la ley de bioseguridad de organismos genéticamente modificados (OGMs).

4. Selección y construcción del circuito eléctrico.

Para el aprovechamiento de la energía eléctrica generada por el proceso, se optó por un circuito eléctrico con arreglo en serie; para ello se construyeron bobinas (las cuales actuaron como los electrodos de las celdas) utilizando tornillos galvanizados y alambre de cobre.

Para que la energía pasase correctamente en el circuito, se necesitó quitar parte del esmalte que recubre al cable de cobre sólo en las terminales de las bobinas, por lo tanto, se procedió a quemar las terminales del cable para que, de esta manera, el circuito funcionara de forma correcta.

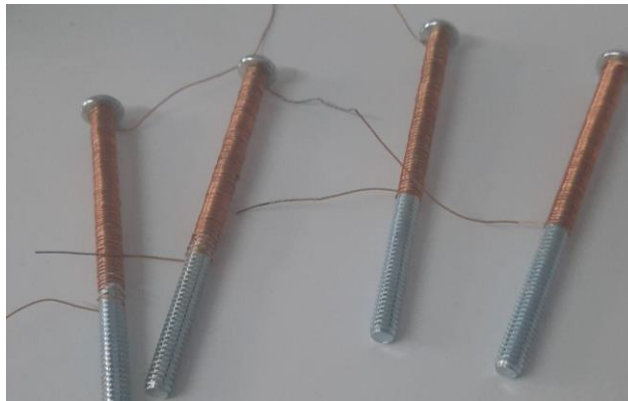


Fig.12 Bobinas elaboradas con tornillos galvanizados y alambre de cobre.

Posteriormente, se añadieron los electrodos a cada unidad para después asignarle su función (ánodo y cátodo) mediante la lectura de la carga que arroja en el multímetro. Una vez identificados el ánodo y cátodo de cada unidad, se procedió a construir el arreglo en serie del circuito.

Se aseguró el buen funcionamiento del circuito en serie, midiendo las terminales de cada lote y verificando que el voltaje fuera constante. Finalmente, se colocó el capacitor en las terminales del circuito de cada lote, para de esta manera, almacenar la electricidad en él.

1.3 Medición y reporte de los parámetros de control de las CCMs

Durante el proceso de degradación, sobresalen con el tiempo las diferentes etapas del proceso de compostaje (mesófila, termófila, de enfriamiento, etc.) por ende, el monitoreo de los parámetros de control es indispensable para poder identificar la etapa en la que se encuentran cada una de las CCMs.

La medición y el reporte de las CCMs se hizo de manera semanal, respetando el día designado y durante el tiempo que tomó el experimento. Los equipos de medición utilizados durante el monitoreo fueron:

- Multímetro.
- Medidor de T° y pH digital.

De primera instancia, se construyó una base de datos en excel donde se alimentaron todos los datos generados de las mediciones de los parámetros monitoreados durante el experimento, tanto de manera individual (cada unidad experimental) como del lote completo.

Al realizar las mediciones, se tomó primero el voltaje producido a lo largo de la semana por el lote correspondiente y posteriormente, se procedió a destapar cada unidad para tomar la lectura de la temperatura y el pH. Para evitar la contaminación de un lote con otro, se enjuagó con agua potable la punta del medidor, quitando así, los restos del lote anterior.



Fig.13 Medición de temperatura y pH de las CCMs.

RESULTADOS

En el presente trabajo de investigación se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales se vieron favorables, ya que cumplen con los objetivos (general y específicos) establecidos al inicio de este.

Como se mencionó anteriormente, el registro de datos se hizo de manera semanal midiendo los parámetros de:

- Voltaje
- Temperatura
- pH
- Humedad

En el día uno, cuando se llevó a cabo el armado de las CCMs, se obtuvieron los siguientes valores:

CCM's por lote	Día 1		
	Parámetros		
	T°C	pH	Voltaje (V)
180-V	19.3	6.5	0.03
180-F	19.7	4.8	0.03
190-V	20	6.3	0.03
190-F	20	6	0.03
196-V	20	6.3	0.03
196-F	20	4.8	0.25
Blanco-V	20	6	0.02
Blanco-F	20	4.5	0.03

Tabla 7. Datos de cada lote CCMs al día uno. Elaboración propia con datos experimentales.

Donde podemos apreciar que la mayor producción de voltaje se obtuvo en la CCM con la cepa #196 y sustrato de frutas; dándonos un valor de 0.25 V.

Durante la medición de los parámetros de control, se pudo observar una variación en los valores con el transcurso de las semanas, así como cambios físicos evidentes en las CCMs (generación de rocío, cambio de color en los sustratos, olor, disminución de volumen, entre otros), por lo tanto, se generaron gráficas por cada parámetro de monitoreo para evaluar el comportamiento a lo largo del tiempo en cada uno de ellos, así como la identificación de la fase predominante en cada momento del proceso y la duración de la fase, esto con base a los valores de los parámetros obtenidos a lo largo del proceso.

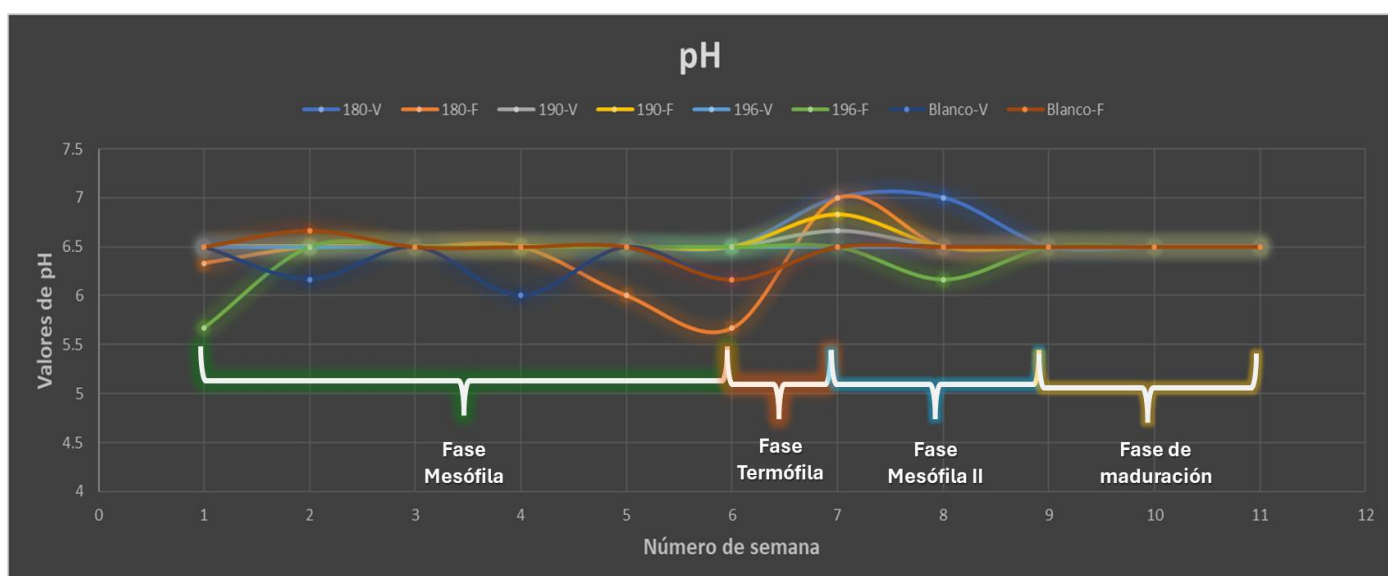
Datos de los parámetros de control:

A continuación, se muestran los siguientes datos experimentales de los cuales se generaron las gráficas correspondientes a cada parámetro de control:

1. Potencial de Hidrógeno

CCM's por lote	Potencial de hidrógeno (pH)										
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
180-V	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	7.0	7.0	6.5	6.5	6.5
180-F	6.3	6.5	6.5	6.5	6	5.7	7.0	6.5	6.5	6.5	6.5
190-V	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.7	6.5	6.5	6.5	6.5
190-F	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.8	6.5	6.5	6.5	6.5
196-V	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
196-F	5.7	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.17	6.5	6.5	6.5
Blanco-V	6.5	6.2	6.5	6.0	6.5	6.2	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
Blanco-F	6.5	6.7	6.5	6.5	6.5	6.2	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5

Tabla 8. Monitoreo de pH por lote en las once semanas de duración del proyecto. Elaboración propia con datos experimentales.



Gráfica 1. Comportamiento del pH a lo largo del tiempo. Elaboración propia con datos experimentales.

Tomando en cuenta que, el proceso de compostaje llevado a cabo en las CCMs fue anaeróbico (ausencia de oxígeno), inevitablemente esto generó mayor producción de ácidos orgánicos durante la degradación de los residuos, por ende, el pH se mantuvo a un nivel más bajo (ácido) de lo normal como consecuencia de los procesos que se llevan a cabo dentro del sistema.

En la gráfica 1 se pueden apreciar los 8 lotes con el número de cepa y tipo de sustrato correspondientes (refiriéndose como "V" a verdura y "F" a fruta). En el eje Y tenemos el rango de valores del pH que se obtuvieron durante el tiempo de monitoreo del proceso, el cual va desde 4.5-7.0. En el eje X se encuentran el número de semanas que duró la investigación.

Basándonos en los datos que se muestran en la gráfica, podemos observar que, a partir de la semana uno hasta la semana seis predominó la fase **mesófila**, ya que hubo un declive en el pH en la mayoría de las CCMs; en cuanto a la fase **termófila**, se observa un aumento significativo del pH de la semana 6 a la semana 7, esto es debido a la pérdida de los ácidos orgánicos y la producción de amoníaco proveniente de la descomposición de las proteínas vegetales, por lo tanto durante ésa semana predominó esta fase.

Continuando, de la semana 7 a la 9 se ve reflejada la etapa **Mesófila II** o también llamada de enfriamiento y maduración en la cual hay nuevamente una pequeña fluctuación en los valores del pH, esto es ocasionado por la proliferación de hongos y actinomicetos, mismos que se encargan de degradar los compuestos orgánicos más complejos. (Casco, J. M., & Bernat, S. M., 2008)

2. Humedad

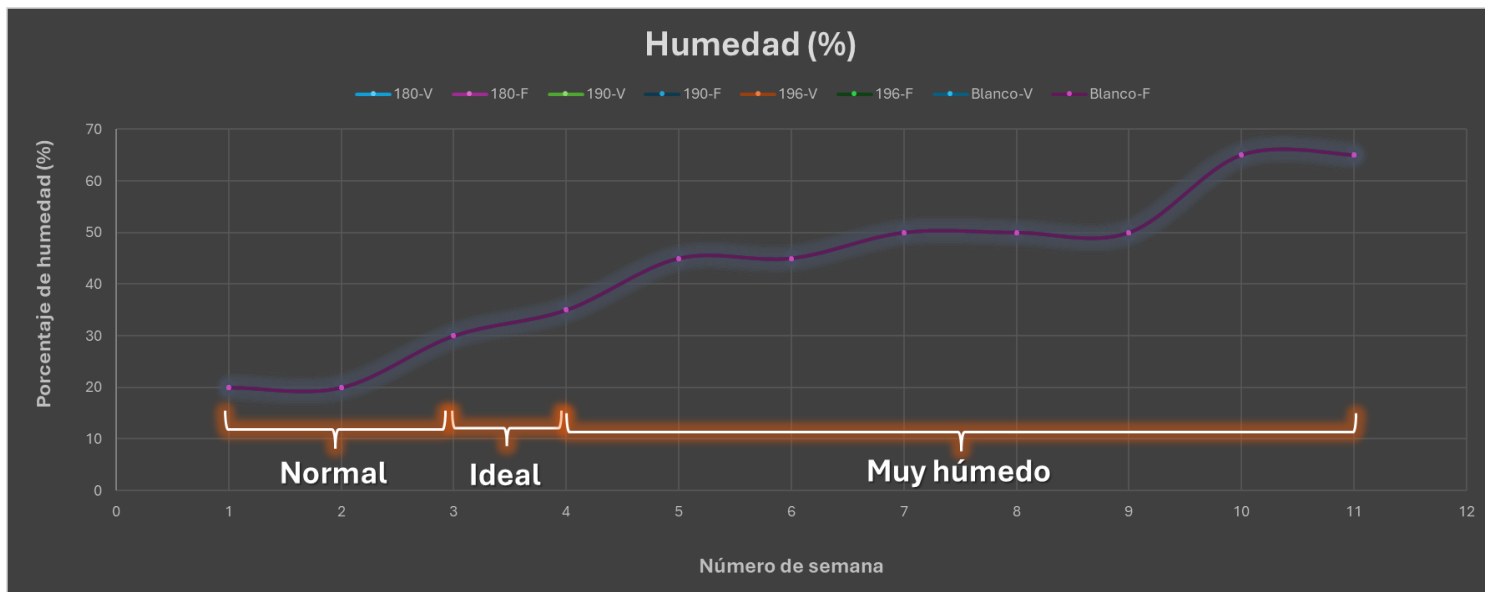
Durante el proceso de degradación de la materia orgánica, se puede observar la cantidad de humedad contenida en las CCMs, sin embargo, recordando que el proyecto trabaja sobre condiciones anaerobias, esta varió a comparación de un proceso de compostaje habitual.

Usualmente la composta se debe de humedecer cada cierto tiempo (dependiendo la biomasa utilizada y el sustrato); en este caso, se dejó de humedecer a partir de la 3era semana, ya que las CCMs se tapaban y esto impedía una aireación satisfactoria.

A continuación, se muestran los porcentajes de humedad obtenidos durante las 11 semanas:

CCM's por lote	H U M E D A D (%)										
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
180-V	20	20	30	35	45	45	50	50	50	65	65
180-F	20	20	30	35	45	45	50	50	50	65	65
190-V	20	20	30	35	45	45	50	50	50	65	65
190-F	20	20	30	35	45	45	50	50	50	65	65
196-V	20	20	30	35	45	45	50	50	50	65	65
196-F	20	20	30	35	45	45	50	50	50	65	65
Blanco-V	20	20	30	35	45	45	50	50	50	65	65
Blanco-F	20	20	30	35	45	45	50	50	50	65	65

Tabla 9. Monitoreo de la humedad por lote en las once semanas de duración del proceso. Elaboración propia con datos experimentales.



Gráfica 2. Incremento de la humedad a lo largo del tiempo. Elaboración propia con datos experimentales.

Tomando en cuenta el intervalo de humedad según Casco, J. M., & Bernat, S. M., 2008, tenemos lo siguiente:

Seco (%)	Normal (%)	Ideal (%)	Muy húmedo(%)
0-20	20-30	30-40	40-60

Tabla 10. Datos del grado de humedad en porcentaje para una composta. Elaboración propia con información obtenida de: Casco, J. M., & Bernat, S. M., 2008.

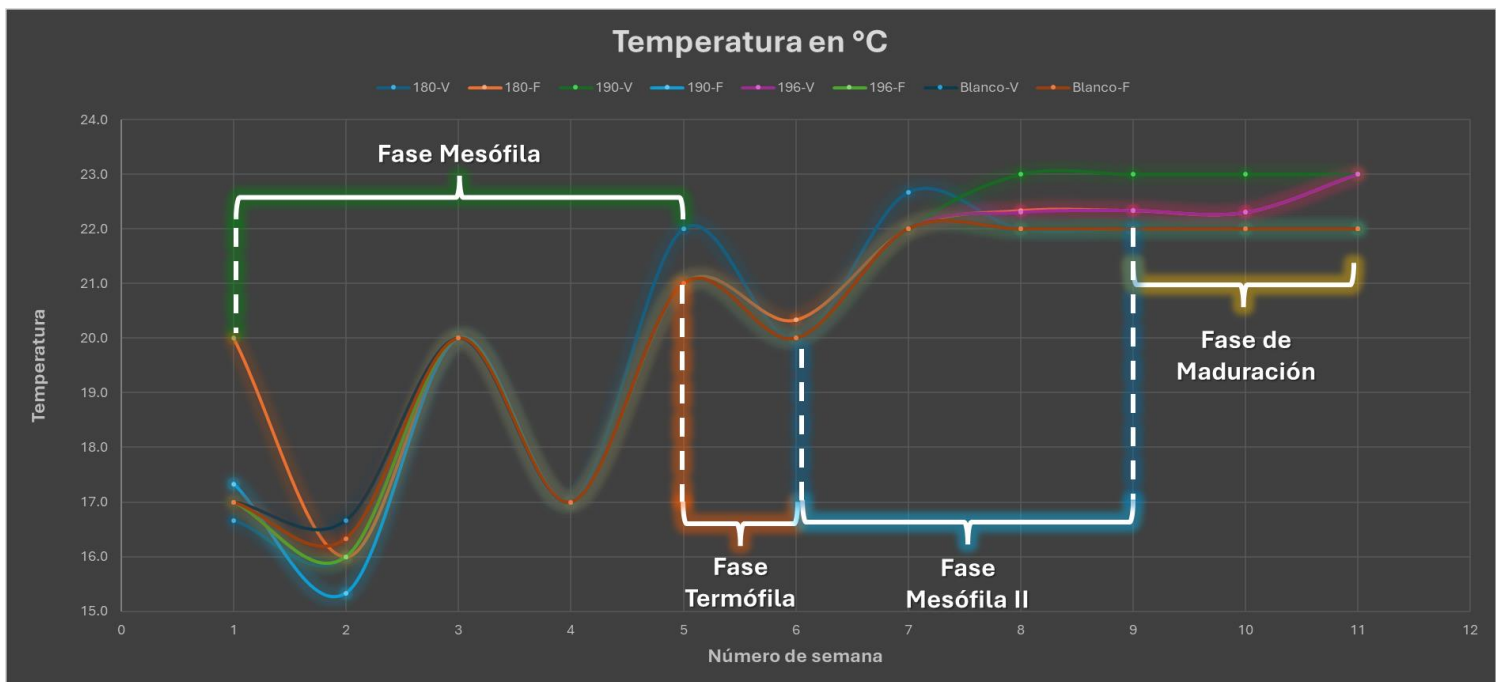
En la gráfica anterior, se observa justamente que, de la primera semana hasta la segunda, se obtuvo una humedad del 20%, lo que nos posiciona en un rango **normal** según la escala reportada por *Moreno Casco (2008)*, esto guarda relación con lo mencionado anteriormente, ya que como estamos en el inicio del proceso de degradación, aún no se presenta gran actividad microbiana.

Siguiendo con la semana 3, se presentó un porcentaje de humedad del 35%, dejándonos en el rango ideal; se puede considerar que, en esta semana se incrementó la actividad microbiana por el avance de la degradación de la materia orgánica. A partir de la semana 4 hasta la semana 11 el medidor marcó “muy húmedo” lo cual nos indicó un porcentaje por encima del 65 por ciento.

3. Temperatura

CCM's por lote	TEMPERATURA (°C)										
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
180-V	16.7	16	20	17	22	20	22.7	22	22	22	22
180-F	20	16	20	17	21	20.3	22	22.3	22.3	22.3	23
190-V	17	16	20	17	21	20	22	23	23	23	23
190-F	17.3	15.3	20	17	21	20	22	22	22	22	22
196-V	17	16	20	17	21	20	22	22.3	22.3	22.3	23
196-F	17	16	20	17	21	20	22	22	22	22	22
Blanco-V	17	16.7	20	17	21	20	22	22	22	22	22
Blanco-F	17	16.3	20	17	21	20	22	22	22	22	22

Tabla 11. Monitoreo de la temperatura por lote en las once semanas de duración del proceso. Elaboración propia con datos experimentales.



Gráfica 3. Comportamiento de la temperatura a lo largo del tiempo. Elaboración propia con datos experimentales.

La temperatura juega un papel clave en la velocidad de descomposición de la materia orgánica durante el compostaje. La temperatura óptima se sitúa entre 45 y 59°C, ya que temperaturas menores de 20°C pueden frenar el crecimiento microbiano y, por lo tanto, la degradación de los materiales (Casco, J. M., Bernat, S. M., 2008), sin embargo, como el proyecto se llevó a cabo a microescala este rango se vió modificado, siendo la T° (temperatura) mínima de 17° C y la T° máxima de 23°C.

En la gráfica anterior se observan varias fluctuaciones en cuanto a aumentos y declives de temperatura (T°); esto se debió a que la T_a (temperatura ambiente) jugó un papel importante en estas variaciones porque el clima no fue constante durante todas las semanas en las que se llevó a cabo el proceso; por lo que, al estar en condiciones anaerobias, el sistema no tuvo suficiente aireación para poder estabilizar la temperatura del proceso con respecto a la T_a .

Se analizaron las fechas exactas de las semanas que duró el proceso junto con los fenómenos climáticos ocurridos en cada una de ellas (si es que existieron), con el fin de identificar la influencia de las variaciones de la temperatura sobre la T° del sistema:

Número de semana	Fecha	Temperatura promedio en $^\circ\text{C}$	Fenómeno natural
1	Ene 15-22	16.60	Frente frío #22
2	Ene 22-29	17.70	Chubascos
3	Ene 29-Feb 5	18.00	Onda de calor
4	Feb 5-12	18.08	-
5	Feb 12-19	17.60	-
6	Feb 19-26	18.08	-
7	Feb 26-Mar 4	19.00	Onda de calor
8	Mar 4-11	19.00	-
9	Mar 11-18	20.00	-
10	Mar 18-25	19.92	-
11	Mar 25-Abr 1	19.25	-

Tabla 12. Fechas de cada semana con sus condiciones climáticas y T° en $^\circ\text{C}$; elaboración propia con información tomada de: AccuWeather, s. f.

De la semana 1-5 se aprecia la fase mesófila del proceso, los picos de T° se deben, como ya se mencionó, a los fenómenos naturales que se presentaron en el medio ambiente y por ende a la T_a .

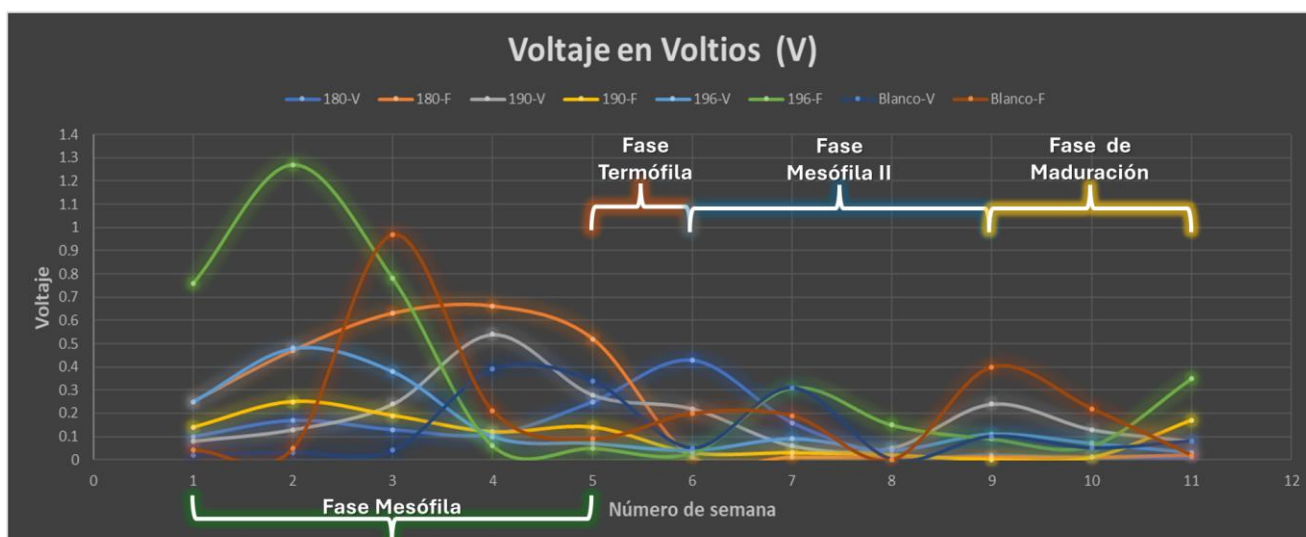
Continuando con la semana de la 5-6 se posiciona la fase termófila caracterizada por un incremento en la T° , seguida de la fase mesófila II o de enfriamiento, comprendida de las semanas 6-9 donde se llevó a cabo la disminución de la T°

del sistema, finalmente en la etapa de maduración (comprendida de las semanas 9-11) se llegó a la estabilización de la T° del sistema.

4. Voltaje

CCM's por lote	V O L T A J E (V)										
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
180-V	0.1	0.17	0.13	0.11	0.25	0.43	0.16	0.02	0.02	0.01	0.01
180-F	0.25	0.47	0.63	0.66	0.52	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
190-V	0.08	0.13	0.24	0.54	0.28	0.22	0.06	0.05	0.24	0.13	0.08
190-F	0.14	0.25	0.19	0.12	0.14	0.03	0.03	0.02	0.00	0.01	0.17
196-V	0.25	0.48	0.38	0.10	0.07	0.04	0.09	0.04	0.11	0.07	0.03
196-F	0.76	1.27	0.78	0.06	0.05	0.03	0.31	0.15	0.09	0.06	0.35
Blanco-V	0.02	0.03	0.04	0.39	0.34	0.05	0.31	0.00	0.10	0.05	0.08
Blanco-F	0.04	0.05	0.97	0.21	0.09	0.20	0.19	0.00	0.40	0.22	0.02

Tabla 13. Monitoreo del voltaje obtenido por lote en las once semanas de duración del proceso. Elaboración propia con datos experimentales.



Gráfica 4. Comportamiento del voltaje a lo largo del tiempo. Elaboración propia con datos experimentales.

La generación de electricidad producida por el sistema de las CCMs, fue medida mediante un multímetro en la unidad de voltios; al ser un bioproceso, el comportamiento de los microorganismos característicos de cada fase es impredecible y variable, por lo que el voltaje (bajo estas condiciones del sistema) no se puede tomar como un parámetro de referencia percé para identificar la fase en la que se encuentra el proceso de degradación, sin embargo, con ayuda de los parámetros anteriores, podemos identificar las etapas del proceso.

Se pueden identificar las distintas fases del proceso de degradación, de la semana 1-5 observamos la fase mesófila; durante esta fase se observan los picos más notorios de las diferentes CCMs, ya que, al ser el inicio de la fase, el

proceso de degradación va arrancando junto con la interacción de los inóculos con los sustratos. De la semana 5-6 se lleva a cabo la fase termófila, en esta fase se puede observar que el voltaje ya no tiene una diferencia tan radical en comparación con la fase anterior; siguiendo con las semanas 6-9, estamos en la etapa de enfriamiento en la cual se puede observar que hay un aumento general de voltaje en todas las CCMs (independientemente del valor en voltios) así como los declives en el mismo. Finalmente, en la etapa de maduración, la cual es comprendida de la semana 9-11, es aún más notoria la estabilidad que empieza a tener el comportamiento del voltaje de las CCMs.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con los resultados obtenidos, y con el objetivo de generar un poco más de conocimiento y entendimiento acerca del bioproceso que se ha aplicado se procedió a elaborar estadísticos que nos permitan correlacionar los parámetros de control con respecto a la generación de electricidad, los cuales se mostrarán al final de este apartado.

Revisando artículos y documentos oficiales, se eligió únicamente el trabajo de generación de electricidad a partir de una CCM en PEM (Membranas de intercambio de protones) de (*Alzate-Gaviria et al., s. f.*), esto debido a la similitud de los parámetros de control que emplea, así como el interés de registrar el rendimiento energético de una CCM en términos de electricidad y el uso de inóculos bacterianos como biocatalizadores; donde describen la realización del proceso, el cual se tomó para contrastar los resultados obtenidos de la presente investigación.

Características	Presente Investigación	Proyecto de contraste
Tipo de sustrato/matriz	Composta de residuos orgánicos (cáscaras de frutas y verduras)	Agua residual sintética
Máximo voltaje obtenido	1.27 voltios	1.05 voltios
Diseño de CCMs	Envases plásticos con capacidad de 1L con tapa.	Recipientes de vidrio con capacidad de 350mL, película de 183µm reforzada a base de un copolímero de PTFE (teflón)/ácido perfluoro sulfónico).
Inóculos utilizados	Bacterias aisladas de jales mineros (3 cepas).	Bacterias obtenidas de un inóculo mixto anaerobio entérico.
Subproductos generados	Bioetanol Biogás (metano) Hidrógeno (g) Agua (g) Protones libres (H ⁺)	Bioetanol Biogás Hidrógeno _(g)
Material de los electrodos	Acero galvanizado y cobre.	Papel carbón.

Tabla 14. Cuadro comparativo con el proyecto de CCM tipo PEM. Elaboración propia con datos experimentales de este proyecto y los recuperados de (Alzate-Gaviria et al., s. f.).

En la tabla anterior, se observan las seis características que se usan como base para la siguiente discusión:

El tipo de sustrato utilizado en la presente investigación fue una composta de residuos orgánicos; en cuanto al otro proyecto, utilizaron agua residual preparada en un laboratorio (sintética) con reactivos grado laboratorio.

En este caso, el sustrato de este proyecto lleva a cabo un proceso de biodegradación por sí mismo (compostaje) asistido por bacterias, lo cual es un punto a favor, ya que se están aprovechando los desechos que generamos los seres humanos día a día dentro de nuestras actividades, así como la valorización del residuo dentro del bioproceso aplicado anteriormente mencionado, para convertirlo en energía eléctrica que puede ser almacenada y posteriormente utilizada; sin mencionar que, también se convierte el sustrato en humus que puede emplearse para nutrir el crecimiento de plantas y/o cultivos.

Siguiendo con la obtención de voltaje máximo, en este proyecto se obtuvo un máximo de 1.27 voltios, mientras que en el proyecto de contraste fueron 1.05 voltios, dándonos una diferencia de 0.22 voltios. Se produjo un 17.3% más que en el proyecto con el que comparamos los resultados. Cabe destacar que, el proyecto contraste utilizó inóculos mixtos (conjunto de varias bacterias, consorcios bacterianos) los cuales añadieron al sustrato, por el contrario, en el presente proyecto sólo se utilizaron inóculos de cepas bacterianas individuales, con lo cual se obtuvo una mayor cantidad de voltaje. Si en un hipotético caso se llegase a emplear un consorcio bacteriano integrado con varias de las cepas probadas actualmente, el resultado esperado pudiera ser una mayor generación de electricidad.

Con respecto al diseño de las CMMs, en el presente proyecto se utilizaron contenedores de plástico con capacidad de un litro cada uno, se eligieron estos por la naturaleza del sustrato, que, en este caso fue la composta para que el proceso se realizara adecuadamente. En cuanto al material de los electrodos, éstos eran de acero galvanizado con alambre de cobre.

El proyecto contraste, al ser una CCM tipo PEM, los materiales y el diseño de las celdas fueron totalmente diferentes, los recipientes que utilizaron tenían 350 mL de capacidad y eran de vidrio con electrodos de papel carbón.

Durante el proceso de degradación de la materia orgánica, se producen distintos subproductos, esto dependiendo de la predominancia de la fase en cuestión.

ANOVA

Con respecto al análisis de varianza ANOVA realizado con los datos generados en el proyecto, este se llevó a cabo con ayuda del software Origin Pro v.9.9.5.

A continuación, se mostrará la base de datos de los parámetros dependientes con respecto a la variable independiente, se designó al voltaje como la variable independiente, ya que es el parámetro que nos indica la generación de electricidad durante el proceso, por ende, los parámetros de Temperatura, pH y humedad fueron las variables dependientes, pues se necesitaba analizar la relación de cada una con respecto al voltaje.

	A(X)	B(Y)	C(Y)	D(Y)
Long Name	Voltaje	Temperatu	pH	Humedad
Units	voltios	°C		%
Comments				
F(x)=				
1	0.1	16.66667	6.5	20
2	0.25	20	6.33333	20
3	0.08	17	6.5	20
4	0.14	17.33333	6.5	20
5	0.25	17	6.5	20
6	0.76	17	5.66667	20
7	0.02	17	6.5	20
8	0.04	17	6.5	20
9	0.17	16	6.5	20
10	0.47	16	6.5	20
11	0.13	16	6.5	20
12	0.25	15.33333	6.5	20
13	0.48	16	6.5	20
14	1.27	16	6.5	20
15	0.03	16.66667	6.16667	20
16	0.05	16.33333	6.66667	20
17	0.13	20	6.5	30
18	0.63	20	6.5	30
19	0.24	20	6.5	30
20	0.19	20	6.5	30

Tabla 15. Datos experimentales por parámetro. Elaboración propia con datos experimentales de este proyecto. Origin Pro v.9.9.5.

En la tabla anterior, se puede apreciar la base de datos experimentales obtenidos durante la investigación, los cuales están encabezados por cada parámetro según corresponda.

Se adjuntaron todos los datos recopilados durante las 11 semanas en las que se llevó a cabo el proyecto, para que así el software Origin nos arrojara un resultado global.

Se eligió la utilizó un análisis de varianza ANOVA de una vía, ya que el factor independiente es el que se requiere contrastar con los otros parámetros; donde se obtuvo lo siguiente:

Estadísticas descriptivas

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
Voltaje	88	0	0.18784	0.23004	0.02452
Temperatura	88	0	20.24129	2.32146	0.24747
pH	88	0	6.47727	0.19275	0.02055
Humedad	88	0	43.18182	14.89777	1.58811

Tabla 16. Datos experimentales por parámetro. Elaboración propia con datos experimentales de este proyecto. Origin Pro v.9.9.5.

En la tabla 13 se calculó la media de los datos por parámetro, la desviación y el error estándar de la media.

ANOVA general

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3	95768.62835	31922.87612	561.47183	<0.0001
Error	348	19785.78509	56.8557		
Total	351	115554.41344			

Tabla 17. Resultados del ANOVA. Elaboración propia con datos experimentales del proyecto. Origin Pro v.9.9.5.

En la tabla 14 se puede observar los diferentes resultados del ANOVA referente a los datos experimentales utilizados.

Si observamos la tabla, podemos darnos cuenta de que la población es significativamente diferente, esto de acuerdo con lo mostrado por el alto valor de F, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en la investigación, ya que los valores de las variables medidas no fueron constantes a lo largo de la duración del proceso respecto al comportamiento de la generación eléctrica.

Comparación de medias (método de Tukey)

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
Temperatura Voltaje	20.05345	1.13674	24.94844	<0.0001	0.05	1	17.11897	22.98792
pH Voltaje	6.28943	1.13674	7.82466	<0.0001	0.05	1	3.35495	9.22391
pH Temperatura	-13.76402	1.13674	17.12377	<0.0001	0.05	1	-16.69849	-10.82954
Humedad Voltaje	42.99398	1.13674	53.48869	<0.0001	0.05	1	40.0595	45.92845
Humedad Temperatura	22.94053	1.13674	28.54025	<0.0001	0.05	1	20.00605	25.87501
Humedad pH	36.70455	1.13674	45.66402	<0.0001	0.05	1	33.77007	39.63902

Tabla 18. Resultados del ANOVA. Elaboración propia con datos experimentales del proyecto. Origin Pro v.9.9.5.

La tabla 15 de comparación de medias, nos muestra qué tan diferente es la relación de cada una de las variables entre sí, tal como se muestra en la primera columna, considerando el error de alfa= 0.05, observándose que el valor de significancia para todos los casos es de 1 lo cual indica que hay una diferencia de medias significativa entre cada uno de los pares de variables comparadas; lo que implica que no hay una relación directa entre ellas.

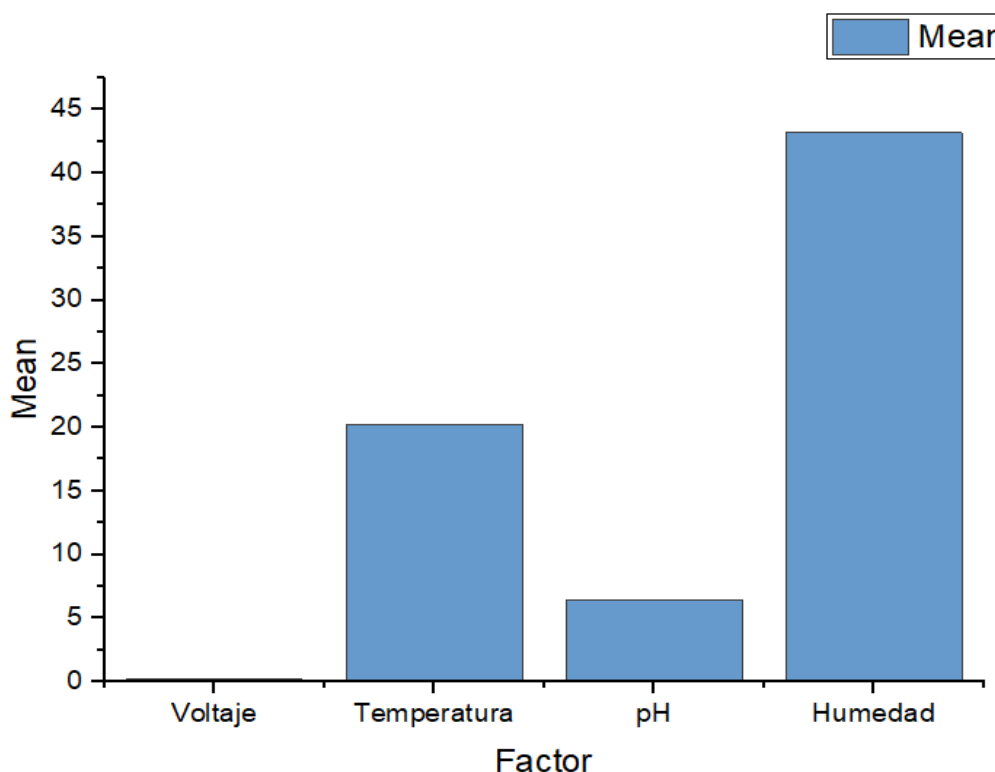
Homogeneidad de la varianza (Prueba de Levene)

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3	9043.56044	3014.52015	171.91931	<0.0001
Error	348	6102.00809	17.53451		

Tabla 19. Resultados del ANOVA. Elaboración propia con datos experimentales del proyecto. Origin Pro v.9.9.5.

De la tabla 16 de la homogeneidad de la varianza, se concluye que los valores de los parámetros son significativamente diferentes.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos, interpretados en diferentes gráficos:



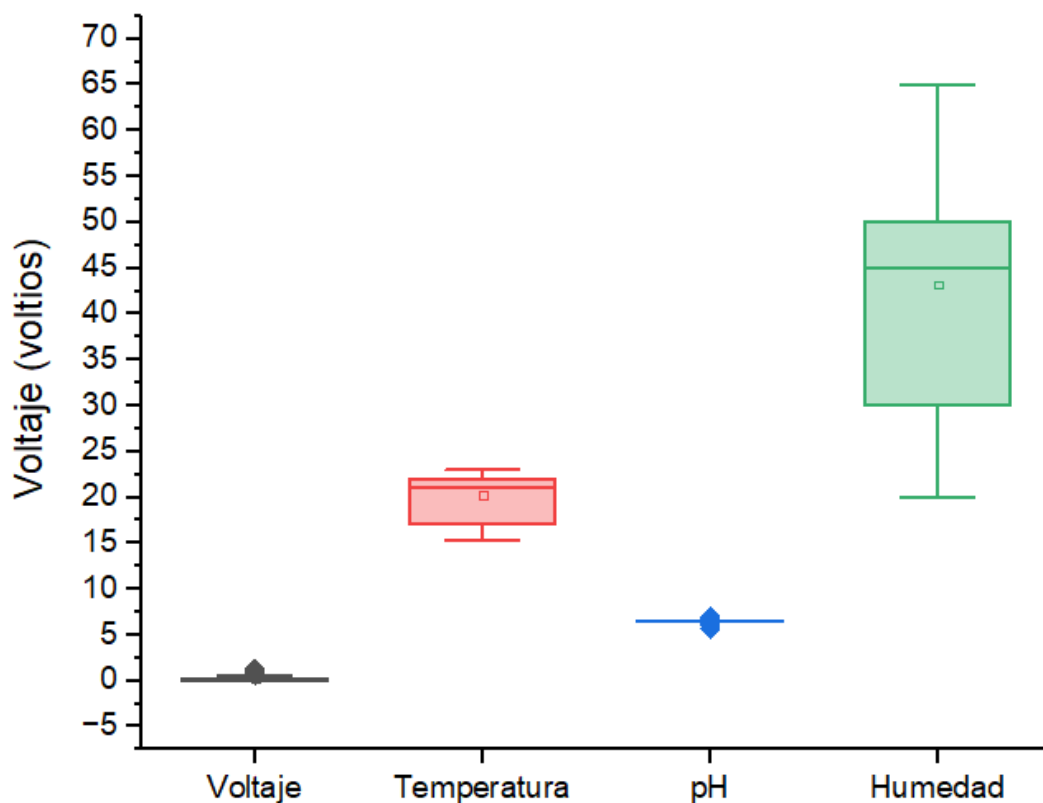
Gráfica 5. Gráfico de barras representando el valor de la media. Elaboración propia con datos experimentales de este proyecto.

En la gráfica 5, se observan los valores calculados de la media de cada uno de los parámetros, los cuales son los siguientes:

Parámetros	Valor de la media calculado
Voltaje	0.18784
pH	6.47727
Temperatura	20.24129
Humedad	43.18182

Tabla 20. Valores calculados de la media de cada uno de los parámetros. Elaboración propia con datos experimentales del proyecto. Origin Pro v.9.9.5 2024.

El promedio de la variable más alta fue la humedad con casi un 43.2% en la duración de la investigación; como se mencionó anteriormente, este porcentaje es un grado muy alto de humedad en comparación con el proceso de compostaje a condiciones normales; seguido de la temperatura con 20.24°C, el pH con 6.5 (redondeando) y el voltaje con un valor de 0.18784.



Gráfica 6. Gráfico de cajas y bigotes representando del valor mínimo al máximo de cada parámetro. Elaboración propia con datos experimentales de este proyecto.

En el gráfico de cajas, se pueden apreciar los valores mínimos y máximos de cada parámetro, así como las diferencias de las varianzas, dichos valores son:

Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo
Voltaje (voltios)	0	1.27
Temperatura (°C)	15.3	23
pH	5.7	7
Humedad (%)	20	65

Tabla 21. Reporte de los valores mínimos y máximos de cada parámetro. Elaboración propia con datos experimentales de este proyecto.

Coeficiente de correlación de Pearson

Para el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson, se utilizó nuevamente el software de Origin pro v. 9.9.5 2024, utilizando los datos experimentales de todos los parámetros de control en cuestión.

A continuación, se ilustran los resultados obtenidos:

Estadísticas descriptivas

	N	Mean	SD	Sum	Min	Max
Voltaje	88	0.18784	0.23004	16.53	0	1.27
Temperatura	88	20.24129	2.32146	1781.23333	15.33333	23
pH	88	6.47727	0.19275	570	5.66667	7
Humedad	88	43.18182	14.89777	3800	20	65

Tabla 22. Resultados de los cálculos para la correlación del coeficiente de Pearson. Elaboración propia con datos experimentales del proyecto. Origin Pro v.9.9.5.

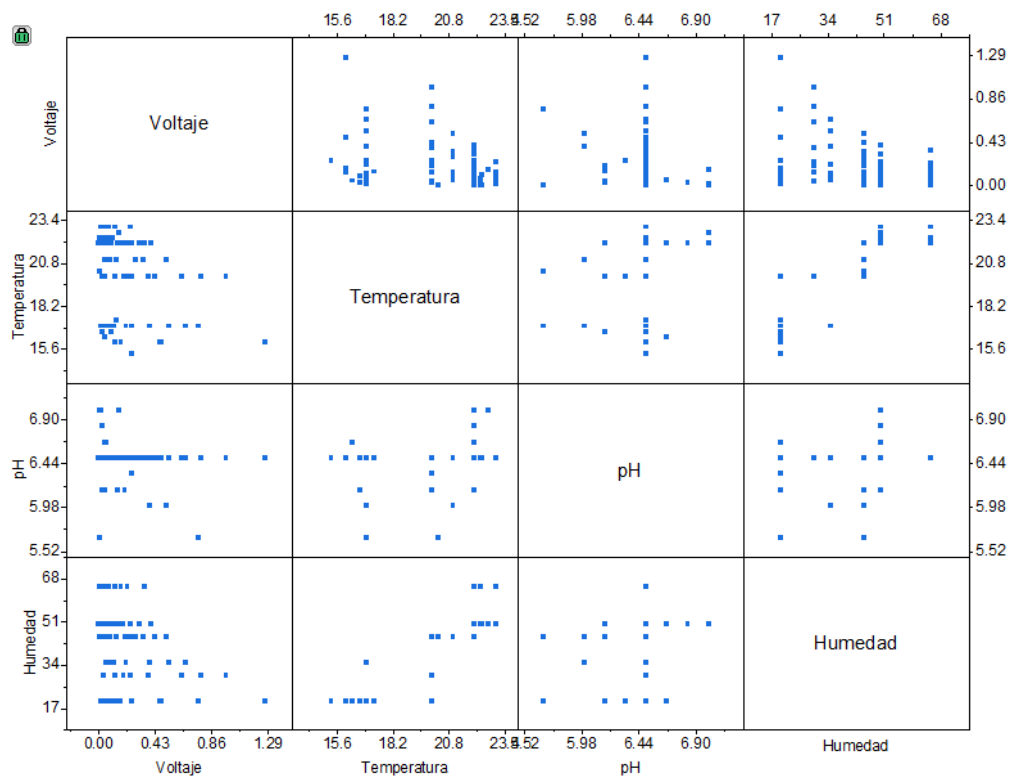
En la tabla 19, podemos observar las estadísticas descriptivas, en las cuales nos muestra la compilación de datos analizados de cada parámetro de control, dándonos los resultados de la desviación estándar, donde se confirma que la variación entre los datos de las diferentes variables medidas es muy amplia.

Correlaciones de Pearson y el valor de “P”

		Voltaje	Temperatura	pH	Humedad
Voltaje	Pearson Corr.	1	-0.34514	-0.20288	-0.38903
	p-value	--	9.90364E-4	0.05799	1.79686E-4
Temperatura	Pearson Corr.	-0.34514	1	0.2022	0.85983
	p-value	9.90364E-4	--	0.05886	<0.0001
pH	Pearson Corr.	-0.20288	0.2022	1	0.15556
	p-value	0.05799	0.05886	--	0.14782
Humedad	Pearson Corr.	-0.38903	0.85983	0.15556	1
	p-value	1.79686E-4	<0.0001	0.14782	--

Tabla 23. Resultados de los cálculos para la correlación del coeficiente de Pearson. Elaboración propia con datos experimentales del proyecto. Origin Prov.9.9.5.

Se puede observar el coeficiente de correlación de cada parámetro, así como el nivel de significancia de la prueba (valor de “P”), este valor, mide el grado de relación entre las variables (va de (-1) a 1), sin embargo, se podría decir que, ya que el nivel de significancia es tan bajo (<0.05) lo cual nos indica que, no hay una relación significativa entre las variables.



Gráfica 7. Matriz de dispersión representando del valor mínimo al máximo de cada parámetro. Elaboración propia con datos experimentales de este proyecto.

En el gráfico 7, se puede observar el comportamiento de cada uno de los parámetros, dichos cuadrantes, no presentan un comportamiento cercano a una regresión lineal directa o inversa, por lo cual se confirma una vez más que no hay una relación directa entre las variables.

Con esto concluimos que, no hay una relación directa o inversa de todos los parámetros con respecto al voltaje, sin embargo, sí se observó una relación entre las variables de temperatura y pH, lo cual refleja la conexión entre las rutas metabólicas llevadas a cabo por los microorganismos para la biodegradación de los residuos orgánicos y por ende la actividad microbiana.

CONCLUSIONES

1. De este experimento, con la cantidad de inóculo usado y con la cantidad de cepas se obtuvo una elevada cantidad de voltaje, considerando que es un proyecto a microescala.
2. La valorización y el aprovechamiento de los residuos orgánicos que los seres humanos producimos en nuestras actividades diarias, son una opción viable para la economía circular y la producción de energía eléctrica.
3. El empleo de biotecnología aplicada a partir del uso de bioprocesos de transformación de sustratos asistidos por bacterias demuestra ser una opción viable para potencializar dichos bioprocesos.
4. No hay una relación directa o inversa de todos los parámetros con respecto al voltaje, sin embargo, sí se observó una relación entre las variables de temperatura y pH, lo cual refleja la conexión entre las rutas metabólicas llevadas a cabo por los microorganismos para la biodegradación de los residuos orgánicos y por ende la actividad microbiana.

RECOMENDACIONES

Para mejorar los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, se recomienda tomar en cuenta lo siguiente:

- En lo que respecta para el circuito en serie, se requiere utilizar una resistencia para poder tener una retención de carga constante, de esta manera, el almacenamiento será aún más eficiente en el capacitor y con eso se puede calcular el amperaje que arroja cada lote.
- Diseñar un prototipo de un biorreactor específico para este tipo de proceso, con materiales especializados, para que, a su vez, se pueda construir un tipo de celda energética donde se registre el amperaje por celda y así estimar la eficiencia energética.
- Hacer uso de consorcios bacterianos (inóculos mixtos) como biocatalizadores para generar una mayor producción de energía eléctrica en cada lote, en vez de un inóculo de una cepa pura.

BIBLIOGRAFÍA

- Mondal, A. K., & Bansal, K. (2015). A brief history and future aspects in automatic cleaning systems for solar photovoltaic panels. *Advanced Robotics*, 29(8), 515-524.
- Vijay, S., Molina, L. T., & Molina, M. J. (2004). Cálculo de emisiones de contaminación atmosférica por uso de combustibles fósiles en el sector eléctrico mexicano.
- Energy, U. (2021, 1 noviembre). Origin Story - Ubiquitous Energy. Ubiquitous Energy. <https://ubiquitous.energy/origins-story/>
- Juárez-Luna, D., & Urdiales, E. (2021). Generación de electricidad fotovoltaica: ignorada, en la práctica como en la teoría, en México. (S/f). Researchgate.net. Recuperado el 18 de mayo de 2023, de https://www.researchgate.net/figure/FUENTE-International-Energy-Agency-IEA-2020-p-7-China-Europa-EE-UU-India_fig1_346479743
- Lamigueiro, O. P. (2013). Energía solar fotovoltaica. *Creative Commons ebook. España. 192pp.*
- Sánchez-Muñoz, M. D. P., Cruz-Cerón, J. G., & Maldonado-Espinel, P. C. (2019). Gestión de residuos sólidos urbanos en América Latina: un análisis desde la perspectiva de la generación. *Revista Finanzas y Política Económica*, 11(2), 321-336.
- Revelo, D. M., Hurtado, N. H., & Ruiz, J. O. (2013). Celdas de combustible microbianas (CCMs): Un reto para la remoción de materia orgánica y la "Boletín" (s.f.). Recuperado el 4 de Diciembre del 2023, de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=2383> generación de energía eléctrica. *Información tecnológica*, 24(6), 17-28.
- Scott, K. (2014). Microbial fuel cells: transformation of wastes into clean energy. In *Membranes for Clean and Renewable Power Applications* (pp. 266-300). Woodhead Publishing.
- Serra, P. M. D., & Espíritu-Santo, A. (2021). Sourcing power with microbial fuel cells: A timeline. *Journal of Power Sources*, 482, 228921.
- PROVINCIAL, P. C. D. L. M. ANÁLISIS TEMPORAL DE LA POTENCIA ELÉCTRICA DEL COMPOST DE LA PLANTA COMPOSTERA DE LA MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE LEONCIO PRADO POR MEDIO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANO.
- Verdes, S. (2021, 2 septiembre). ¿Cuál es el mejor método de compostaje? — 360 Soluciones verdes. 360 Soluciones Verdes. <https://www.360-sv.com/blog/tipos-de-compostaje>.
- Residuos orgánicos: ¿Qué son y cómo tratarlos? - Repsol. (2023, 6 octubre). REPSOL. <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/residuos-organicos/index.cshtml>
- Román, P. R., Martínez, M. M. M., & Pantoja, A. P. (2013). Manual de compostaje del agricultor: Experiencias en América Latina. Manual de compostaje del

agricultor, ISBN 978-92-5-307844-8, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://www.fao.org/>

Penélope. (2016, 7 diciembre). El pH durante el compostaje. Compostando Ciencia. <http://www.compostandociencia.com/2013/11/ph-en-el-compostaje-html/>

Innovatione AgroFood Design. (2021, 6 febrero). Compostaje: parámetros y etapas del proceso - Innovatione. Innovatione. <https://innovatione.eu/2019/06/03/compostaje/>

Temperatura y pH en el proceso de compostaje | Productos para agricultura Hanna Instruments. (s. f.). <https://www.hannacolombia.com/agro/blog/item/temperatura-y-ph-en-el-proceso-de-compostaje>

Román, P.; Martínez, M. M.; Pantoja, A. 2013. Manual de Compostaje del Agricultor. Experiencias en América Latina. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO. Oficina Regional para América Latina y el Caribe Santiago de Chile. 112P.

Card es. (s. f.). FAODocuments. <https://www.fao.org/documents/card/es?details=1cea1861-e379-57f9-988e-93be04982954>

Gutiérrez, L. F. M., Caicedo, J. C., & Díaz, F. O. (2019). CORRELACIÓN ENTRE PROPIEDADES ELÉCTRICAS Y FÍSICOQUÍMICAS DURANTE LA MADURACIÓN DEL PLÁTANO DOMINICO HARTÓN. Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería. *Portal CFE*. (s. f.). <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=2383>

Manual de Química y Bioquímica de los Alimentos. T.P. Coultate. Editorial Acribia, S.A. 2ª Edición-1998, Traducción de la Ed. inglesa, 1996.

Manual del Curso de Manipulador de Frutas y Hortalizas. JD Larios Adorna. Consejería de Agricultura y Agua.

Servicio de formación de transferencia Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Save Food: Iniciativa mundial sobre la reducción de la pérdida y el desperdicio de alimentos. Disponible en: <http://www.fao.org/save-food/recursos/keyfindings/infographics/fruit-es/es/Communications>. (2023, 21 febrero). ¿Cómo se obtiene energía de la biomasa? Conoce el proceso. BBVA NOTICIAS. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/como-se-obtiene-energia-de-la-biomasa-conoce-el-proceso/>

RTVE.es. (2020, 24 febrero). Alimentos capaces de generar electricidad. RTVE.es. <https://www.rtve.es/television/20200224/alimentos-capaces-generar-electricidad/2004261.shtml>

Circuitos eléctricos. (s. f.). Endesa. <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/elementos-circuito-electrico>

Circuitos eléctricos: símbolos, tipos y elementos | StudySmarter. (s. f.). StudySmarter ES. <https://www.studysmarter.es/resumenes/fisica/interaccion-electromagnetica/circuitos-electricos/#:~:text=Hay%20cinco%20tipos%20principales%20de,circuito%20abierto%20no%20circula%20corriente>.

JL, B. (2023, 6 octubre). Circuito Eléctrico en Serie. Electrónica Online. <https://electronicaonline.net/circuito-electrico/circuito-en-serie/>

SEMARNAT. (22 de 05 de 2015). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat>

Reglamento de la Ley Federal sobre Protección al Medio Ambiente relativo a los Organismos Genéticamente Modificados, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 11 de mayo de 2022. (DOF, 2022).

Casco, J. M., & Bernat, S. M. (2008). Microbiología y bioquímica del proceso de compostaje. Compostaje, 112-39.

AccuWeather. (s. f.). Tiempo mensual en Puebla, Puebla, México | AccuWeather. <https://www.accuweather.com/es/mx/puebla/245020/march-weather/245020?year=2024>

Pablo Vinuesa, CCG-UNAM. <http://www.ccg.unam.mx/~vinuesa/>. (s. f.). Tema 8 - Correlación: teoría y práctica. https://www.ccg.unam.mx/~vinuesa/R4biosciences/docs/Tema8_correlacion#introduccion-el-concepto-de-correlacion

ANOVA de un factor. (s. f.). Introducción A la Estadística | JMP. https://www.jmp.com/es_mx/statistics-knowledge-portal/one-way-anova.html

Revelo, D. M., Hurtado, N. H., & Ruiz, J. O. (2013). Celdas de combustible microbianas (CCMs): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica. Información tecnológica, 24(6), 17-28.

Untitled document. (s. f.). <http://www.facmed.unam.mx/Libro-NeuroFisio/06-SistemaNervioso/Potenciales/Potencial/Potencial.html>

Alzate-Gaviria, L., Fuentes-Albarrán, C., Álvarez-Gallegos, A., & Sebastián, J. (s. f.). GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD a PARTIR DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA TIPO PEM. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442008000700008