

**CONSTRUCCIÓN DE UN BIORREACTOR IMPLEMENTANDO MONITOREO CONTINUO POR
MEDIO DE UN SISTEMA ARDUINO CON SENSORES PARA MEDICIÓN DE TEMPERATURA,
HUMEDAD Y PH.**

**TANIA DANIELA RINCÓN ROZO
EMILY SALINAS GARZÓN**

**UNIVERSIDAD ECCI
FACULTAD INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTA, D.C.
2023**

**CONSTRUCCIÓN DE UN BIORREACTOR IMPLEMENTANDO MONITOREO CONTINUO POR
MEDIO DE UN SISTEMA ARDUINO CON SENSORES PARA MEDICIÓN DE TEMPERATURA,
HUMEDAD Y PH.**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO
INGENIERA AMBIENTAL**

**TANIA DANIELA RINCÓN ROZO
EMILY SALINAS GARZÓN**

Director:

ERIKA FONSECA ZARAZA

Ingeniera Química

CO – Director:

FRANK JIMY GARCIA NAVARRETE

*Ingeniero Agrícola
Msc.*

**UNIVERSIDAD ECCI
FACULTAD INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTA, D.C.
2023**

Tabla de contenido

Resumen	5
Introducción	6
Descripción del Problema	8
Formulación del Problema	9
Objetivo general	9
Objetivos específicos	9
Metodología	9
Diseño metodológico	9
Materiales y Métodos	11
Recursos	14
Diseño y construcción del Biorreactor.....	16
Diseño conexiones placa Arduino ®	17
Programación del sistema de monitoreo Arduino®.....	18
Evaluación del compostaje en biorreactor	21
Metodología.....	21
Determinación de Materia Orgánica (método calcinación). IGAC (IN-AGR-PC01-51).....	21
Determinación del Contenido de Humedad (Método cuantificación gravimétrica). IGAC (IN-AGR-PC01-50).	22
Determinación de pH. (potencial de hidrógeno). IGAC (IN-AGR-PC01-31).	22
Determinación del Carbonó Orgánico por el Método Walkley - Black. IGAC (IN-AGR-PC01-52).	22
Resultados	23
Análisis Comportamiento (Temperatura Y Humedad). Monitoreo Automatizado Arduino ®	24
Ensayo 1	25
Ensayo 2	25
Ensayo 3	25
Puesta en marcha y evaluación del prototipo.....	26
Análisis Físicoquímico	26
Discusión	30
Conclusiones	32
Recomendaciones	33
Agradecimientos	34
Referencias Bibliográficas	35
ANEXOS	39

Resumen:

La presente investigación nace a partir de la evaluación de los procesos de la planta de compostaje de la universidad ECCI, ya que los residuos generados allí son de alto contenido de celulosa y lignina, las cuales generan una degradación de la biomasa más lenta, para ello se plantea la aceleración del proceso a través de un biorreactor con el fin de evaluar su rendimiento sin afectar la calidad del producto final.

El objetivo del proyecto consistió en evaluar el desempeño de un prototipo de biorreactor construido a escala piloto para la producción de compostaje, a través del monitoreo de la temperatura, humedad y pH empleando una placa Arduino®. La construcción del prototipo de biorreactor, tipo batch, se hizo teniendo en cuenta la aireación, humedad, posición de los sensores y tipo de agitación en función de los materiales disponibles para la construcción (Caneca de 55 Galones con tapa, Tubo PVC y válvula para drenaje de lixiviados); en cuanto al sistema de monitoreo automático se requirió de una placa de Arduino, una pantalla o LCD, un Datalogger o módulo shield SD, una memoria SD y 3 sensores, uno para cada parámetro de control, se programó basado en líneas de código para la lectura de tareas automatizadas. Para el seguimiento del compostaje se realizaron determinaciones en laboratorio de materia orgánica, humedad, carbono orgánico y pH, en tres momentos del experimento; con respecto a la temperatura y pH, se realizó de manera continua a través de los sensores.

Este proyecto contó con tres ensayos experimentales, teniendo en cuenta que durante la puesta en marcha del proceso de compostaje se encontró que la temperatura del sistema no llegó a lo esperado para la fase mesófila. Así, en el segundo ensayo se implementó un aislante térmico con la finalidad de mejorar las condiciones de la temperatura; sin embargo, tampoco fue efectivo. Finalmente, en un tercer ensayo se ejecutó una adecuación del material y se adicionó un fermento para activar el proceso de compostaje.

Palabras clave: Biorreactor, monitoreo automatizado, lignocelulósicos, compostaje, microorganismos.

Introducción

El compostaje es una tecnología de bajo costo y es de las técnicas más usadas para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos, este consiste en la descomposición biológica aerobia, cambiando la estructura molecular del mismo, permitiendo transformar dichos residuos y subproductos orgánicos en materiales biológicamente estables (Vargas Pineda, O. I., et. al., 2019). Así mismo, proporciona la posibilidad de transformar de una manera segura los residuos orgánicos en insumos para la producción agrícola (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2013, p. 5).

La calidad del producto final depende de varios parámetros que intervienen durante el proceso de compostaje, los cuales generalmente oscilan dentro de unos rangos debido a la heterogeneidad de la mezcla inicial (los residuos) y a las posibles variaciones estacionales en su composición que determinan las fases del proceso. Estos parámetros son la temperatura, humedad, relación Carbono-Nitrógeno, presencia de oxígeno, pH, etc. (Rojas y Zeledón, 2007, p. 3). De acuerdo con la temperatura y los diferentes parámetros importantes mencionados durante el proceso, se reconocen cuatro fases principales:

1. *Fase Mesófila.* La materia prima inicia el proceso de compostaje a temperatura ambiente y luego de unos días la temperatura sube a 45°C (UAESP, 2014, p. 39). El aumento de la temperatura se debe a la actividad microbiana, ya que en esta etapa los microorganismos utilizan fuentes simples de C y N para producir calor. Cuando los compuestos solubles, como los azúcares, se descomponen, se producen ácidos orgánicos y, por lo tanto, el pH puede descender (alrededor de 4,0 o 4,5). Esta etapa dura unos pocos días (de dos a ocho días). (FAO, 2013, p. 23).

2. *Fase Termófila o de Higienización.* Cuando el material alcanza una temperatura superior a 45 °C, los microorganismos que crecen a temperaturas intermedias (microorganismos mesófilos) son reemplazados por microorganismos que crecen a temperaturas más altas, en su mayoría bacterias (bacterias termófilas), que facilitan la descomposición de fuentes más complejas. C, como la celulosa y la lignina (FAO, 2013, p. 23).

Estos microorganismos convierten el nitrógeno en amoníaco, lo que hace que aumente el pH del medio. A partir de los 60 °C aparecen bacterias productoras de esporas y actinobacterias, que se encargan de descomponer ceras, hemicelulosas y otros compuestos complejos de carbono. Esta etapa puede durar desde unos pocos días hasta un mes, dependiendo del material de origen, el clima y las condiciones del sitio, y otros factores. (FAO, 2013, p. 23).

Esta fase también se denomina fase de higienización, porque una temperatura superior a 55 °C garantiza un producto final desinfectado, ya que el calor generado destruye las bacterias y las impurezas de las heces, como *Escherichia coli* y *Salmonella* spp. (UAESP, 2014, p. 41).

3. *Fase de Enfriamiento o Mesófila II:* Agotadas las fuentes de carbono y, en especial el nitrógeno en el material en compostaje, la temperatura desciende nuevamente hasta los 40-45°C (UAESP, 2014, pg. 41). En esta etapa siguen descomponiéndose compuestos orgánicos como la celulosa, y aparecen algunas setas y hongos que se pueden ver a simple vista a través de sus hifas. Cuando la temperatura desciende por debajo de los 40°C, los organismos mesófilos continúan descomponiéndose y el pH del medio disminuye ligeramente, aunque el pH suele permanecer en el rango alcalino. Esta fase de enfriamiento dura varias semanas. (FAO, 2013, p. 24).

4. *Fase de maduración:* Es un período que demora meses a temperatura ambiente, durante los cuales se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados para la formación de ácidos húmicos y fúlvicos (UAESP, 2014, p. 42).

Los tres métodos principales utilizados para controlar la temperatura, el pH, la humedad, la relación C/N y el tamaño de las partículas durante el proceso de compostaje son la berma, la pila estática aireada y el biorreactor. Aunque estos procesos difieren principalmente en el método de aireación de los residuos sólidos, los principios biológicos siguen siendo los mismos y, cuando se diseñan y utilizan correctamente, todos producen compost de la misma calidad en aproximadamente la misma cantidad de tiempo.. (Chaparro Montenegro, D. A., Zorro Millán, J. D. 2017, p 28.).

Los biorreactores son unidades procesadoras diseñadas para que en su interior se lleve a cabo una o varias reacciones biológicas dentro de un recipiente cerrado (López, P., 2009, p. 19). Existen

varios tipos de biorreactores, los cuales tienen diferentes aplicaciones y se pueden resumir en tres tipos: el biorreactor discontinuo o tipo batch, el biorreactor perfectamente agitado o Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR), y biorreactor flujo pistón o Plug Flow Reactor (PFR), cada uno es utilizado para diferentes productos y aplicaciones dependiendo de cuál sea el caso (Chaparro, D. y Zorro, J. 2017, p 28). Los biorreactores Batch se emplean para operaciones a pequeña escala, para experimentar con procesos nuevos en el ámbito de laboratorio, y para fabricar productos costosos o de difícil elaboración, además, su construcción tiene un grado de complejidad menor en comparación con los otros tipos de biorreactores (Levenspiel, O., 2004, p. 38-40)

Descripción del Problema

La planta de compostaje de la universidad ECCI ubicada en la calle 170 cuenta con un sistema tradicional de compostaje, esta planta es receptora de los residuos orgánicos generados en la sede producto de las podas y mantenimiento del campus, el cual no da abasto con los residuos producidos dentro de las instalaciones ya que estos en mayor proporción son lignocelulósicos, estos residuos están compuestos de lignina, hemicelulosa, y celulosa, La celulosa está compuesta de largas cadenas de moléculas de glucosa (Han, 2008). Esta estructura y la encapsulación de la lignina de las fibras de celulosa dificultan la hidrolización de las moléculas de este material en comparación con el almidón (García, Quintero y López, 2007). La hemicelulosa también se compone de cadenas largas (Bardales Vásquez, C., et al, 2020), es decir que su tiempo de descomposición requiere de más tiempo.

Debido a la gran proporción de residuos de este tipo generados en el campus, este proceso toma mucho más tiempo del usual, por ende se genera una acumulación de los mismos por su lenta degradación, complicando así, los flujos continuos del material. Es por esto que se plantea crear un prototipo de biorreacción que acelere la descomposición de este material comparando su comportamiento con investigaciones realizadas previamente del sistema convencional de pilas abierto según sus características fisicoquímicas, de ahí parte la creación del diseño y el montaje del sistema de monitoreo de parámetros como pH, temperatura y humedad y la caracterización

fisicoquímica con muestras aleatorias en diferentes etapas del proyecto para evaluar el desempeño del biorreactor.

Formulación del Problema

¿La producción de compostaje a través de biorreacción con monitoreo constante por medio de un sistema de sensores Arduino para parámetros esenciales como temperatura, humedad y pH, es más eficiente que un sistema de compostaje tradicional?

Objetivo general

Evaluar el desempeño de un prototipo de biorreactor construido para la producción de compostaje a través del monitoreo automatizado de temperatura, humedad y pH.

Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de los residuos generados en el campus de la 170
- Diseñar y construir un prototipo de biorreacción a escala piloto, monitoreado continuamente mediante sensores de humedad, pH y Temperatura
- Comparar el comportamiento de degradación de un sistema de compostaje convencional abierto y el sistema de biorreacción.

Metodología

Diseño metodológico

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH.
marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.

Construcción de un biorreactor con sistema de monitoreo continuo.

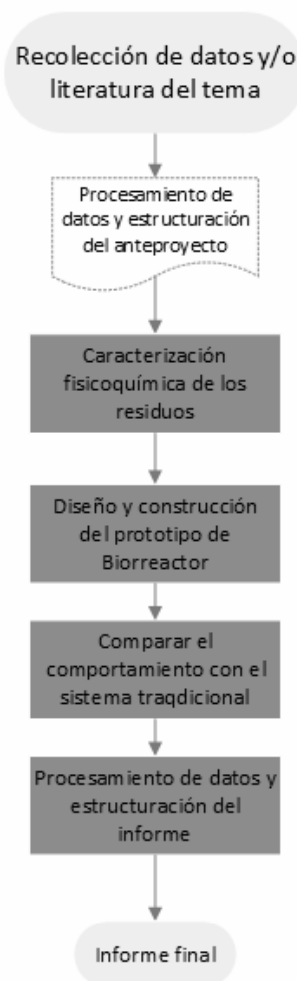


Figura 1. Diseño metodológico.

Fuente: Autores.

Tabla 1. Diseño Metodológico.

Actividad	Metodología	Resultado
Recolección de datos y/o literatura.	Se accederá a bases de datos por suscripción con las que cuenta la Universidad ECCI, se tomarán palabras claves para realizar la búsqueda tales como: Compostaje, Biorreactor, Sistemas de monitoreo, Arduino. Se separarán documentos publicados después del año 2000.	Base de datos
Procesamiento de datos	Se tendrán en cuenta documentos importantes obtenidos de fuentes verídicas y confiables como FAO, MADS, MADR, ICA, UAESP, entre otras no menos importantes, que faciliten manuales y/o guías para establecer procesos.	Marco de referencia de la investigación y estructura inicial del proyecto.

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH.
marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.

Caracterización fisicoquímica	Se tomarán muestras en diferentes fechas con el fin de realizar una caracterización fisicoquímica en el laboratorio, siguiendo la metodología definida por el IGAC (pH, humedad, Carbono orgánico, materia orgánica) de la misma forma los datos tomados por el Arduino se evaluarán constantemente (pH, Temperatura, humedad).	Análisis fisicoquímicos en laboratorio de las muestras tomadas, monitoreo permanente del comportamiento del compost dispuesto en el biorreactor.
Elaboración del prototipo	Se tendrán en cuenta diferentes investigaciones realizadas con el fin de guiar el proceso, de tal modo que se complemente el proyecto con las recomendaciones realizadas, de igual forma se programará el sistema Arduino con sensores de pH, humedad y temperatura.	Biorreactor.
Comparación del comportamiento	Con la información obtenida se procesarán los datos obtenidos con el fin de evaluar y comparar el sistema tradicional de pilas y el biorreactor con los residuos generados en el campus de la 170. Los parámetros evaluados serán: pH, humedad, Carbono orgánico, materia orgánica.	Gráficas comparativas, resultados del proyecto.
Procesamiento de información	Análisis de resultados y estructuración del documento final.	Informe final.

Fuente: Autores.



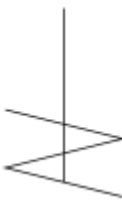

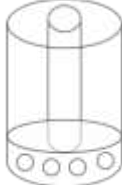
Materiales y Métodos

Para la desarrollo del prototipo de biorreacción con el diseño y construcción de la estructura física del prototipo consideró parámetros expuestos en la tabla 2, tipo de agitación, aireación, humedad y posición de los sensores, asignando una puntuación de 1 a 10 a cada opción teniendo en cuenta, disponibilidad de recursos, presupuesto, condiciones locativas e investigaciones previas. Con respecto a la agitación se eligió tipo columna o vertical debido a que este tipo es económico, fácil de montar, monitorea y regula la humedad, la temperatura, la biomasa y el CO₂. Requiere una pequeña cantidad de material y fácil adaptación del equipo a los sistemas básicos y la cuantificación del producto le da practicidad. (Ruíz-Leza, H. A., et al. 2007).

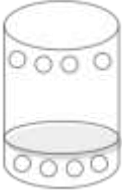


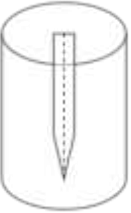
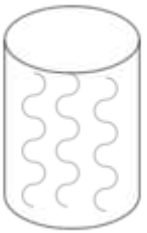
La aireación quedó de manera central homogénea, fácil instalación y no requiere mantenimiento y la agitación se dejó de tipo manual ya que no requiere gasto energético ni costos extras, se invirtió en el sistema de monitoreo ya que anteriores investigaciones han señalado que las variables que

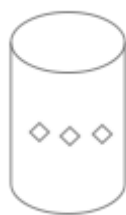
mayor impacto tienen en la biodegradación de materia orgánica en compost son: la temperatura, la humedad y el pH (M. Awasthi, K. Pandey, A.K Khan, J. Bundela, 2014).

Tabla 2. Elección tipo de prototipo.

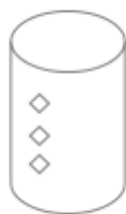
Parámetro	Diseño	Gasto Energético	Costo	Beneficio y Viabilidad	Puntos 1-10
Agitación	Horizontal 	Sin gasto energético	Requiere costos extras para sostenerlo	Necesita una base para sostenerlo	8
	Vertical 	Sin gasto energético	No requiere costos extra	Se sostiene solo en un terreno firme	10
	Helicoidal 	Se puede hacer de forma manual, por lo tanto, no requiere gasto energético	Requiere costos extras en su construcción	Permite una fácil rotación al generar un movimiento tipo tornillo	6
	Transversal 	Se puede hacer de forma manual en consecuencia no requiere gasto energético	Requiere costos extras en su construcción	Su rotación se da homogéneamente en todas las áreas	10
Aireación	Central e inferior 	No requiere gasto energético, sistema estático	No requiere costos extra	Aireación homogénea, fácil instalación y no requiere mantenimiento	9

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH. marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.

	<p>Superior e inferior</p> 	No requiere gasto energético, sistema estático	No requiere costos extra	Puede presentar parches secos, fácil instalación y no requiere mantenimiento	7
	<p>Costados e inferior con motor</p> 	Requiere gasto energético, al incluir un ventilador en su sistema	Requiere costos extra al incluir un ventilador	Buena aireación, requiere diferentes procesos en la instalación	5
	<p>Con grava</p> 	No requiere gasto energético, sistema estático	Requiere costos extra al incluir un material extra	Requiere mantenimiento delicado, fácil instalación y genera mezcla de compuestos	2
Humedad		Requiere energía ya que está conectado a una bomba	No presenta costos extra, el sistema está disponible en el campus	Se reparte homogéneamente y de forma eficaz	9
	<p>Evaporación</p> 	No requiere gasto energético	No requiere costos extra	No es homogéneo, puede ser demorado y depende de factores ambientales	8
Posición de los sensores	Horizontal	No requiere gasto energético extra	No requiere gastos extra	Toma de datos homogénea	10



Vertical



No requiere
gasto
energético
extra

No requiere
gastos extra

Toma de datos
heterogénea

7

Fuente: Autores.

Recursos

En función del proyecto, se describe en la tabla 3 los recursos y el presupuesto usado durante el proyecto, adicionalmente se tuvieron en cuenta otros recursos humanos, recursos físicos como las instalaciones del laboratorio de la universidad ECCI, sede P, planta de compostaje en el campus de la universidad ECCI, materiales de laboratorio como kit de análisis de suelos, balanzas, entre otros. Recursos financieros y/o económicos de contribución propia como portátiles, acceso a internet y por último los suministrados por la universidad descritos en la tabla 3

Tabla 3. Recursos económicos.

No	Descripción	Propósito del equipo en el proyecto	Costo	Cantidad
1	Caneca Plástica De 55 Galones Cuerpo Liso con tapa	Producción de prototipo de biorreactor.	\$ 147.322	1
2	Flanche plástico para tanques 1"	Producción de prototipo de biorreactor.	\$ 35.950	1

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH.
marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.

3	Rollo de manguera de nivel de 1"	Producción de prototipo de biorreactor.	\$ 18.000	3 m
4	Silicona líquida para pegar plástico	Producción de prototipo de biorreactor.	\$ 20.000	1
5	Válvula Bola PVC 1" Roscada	Producción de prototipo de biorreactor.	\$ 27.986	1
6	Malla metálica	Producción de prototipo de biorreactor.	\$ 35.900	5 m
7	Tubería de 1"	Producción de prototipo de biorreactor.	\$ 13.923	1
8	Arduino uno r3 atmega328p montaje superficial	Monitoreo automatizado	\$ 28.000	1
9	Bornera expansión shield	Monitoreo automatizado	\$ 20.000	1
10	Shield Teclado Lcd Para Arduino	Monitoreo automatizado	\$ 47.600	1
11	Shield sd card para-Arduino	Monitoreo automatizado	\$ 24.100	1
12	Sonda Sensor De Temperatura DS18B20	Monitoreo automatizado	\$ 7.000	1
13	Sensor De Humedad Del Suelo	Monitoreo automatizado	\$ 30.000	1
14	Sensor de pH SEN0161	Monitoreo automatizado	\$ 154.700	
15	Caja plástica para proyectos de 15 x 6 x 9.9 cm	Monitoreo automatizado	\$ 23.900	1
16	Adaptador de energía Arduino - Fuente 6 Voltios 2 Amperios	Monitoreo automatizado	\$ 14.700	1

Fuente: Autores.

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH. marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.

Diseño y construcción del Biorreactor.

La selección del tipo de biorreactor se realizó a partir del análisis de los parámetros de proceso, agitación, aireación, humectación del sustrato, posición de sensores, eficiencia energética, costos, beneficios y viabilidad técnica en el montaje del equipo. Así, se seleccionó un biorreactor tipo Batch, con agitación manual para la homogeneización del material (Figura 2).

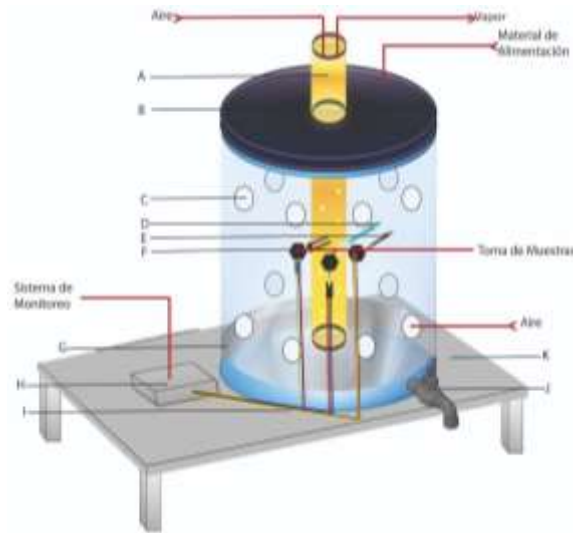
Para la construcción del prototipo de biorreactor se tuvo en cuenta el diseño presentado en la figura 2 y se usaron los siguientes materiales, y en el anexo 4 se encuentra toda la evidencia fotográfica sobre la construcción:

Tabla 4. Insumos

Insumo	Material	Conductividad	Observaciones
Caneca de 55 Galones.	Polietileno de alta densidad. 95 cm X 55 cm X 50 cm	0,44 W/m·K (Araújo, J. R.; Waldman, W. R. y De Paoli, M. A., 2008).	Con orificios perimetrales que promuevan la aireación
Tubo central	PVC	0'16 W/m·K (Araújo, J. R.; Waldman, W. R. y De Paoli, M. A., 2008).	Para drenaje de lixiviados
Válvula inferior	Polietileno de alta densidad.	0,44 W/m·K (Araújo, J. R.; Waldman, W. R. y De Paoli, M. A., 2008).	
Placa Arduino y sensores	N/A	N/A	

Fuente: Autores.

De igual forma, en el anexo 2 podemos encontrar al detalle las especificaciones del biorreactor, cada uno de los elementos elegidos para el diseño, su ubicación, cableado, sistema de sensores, etc.



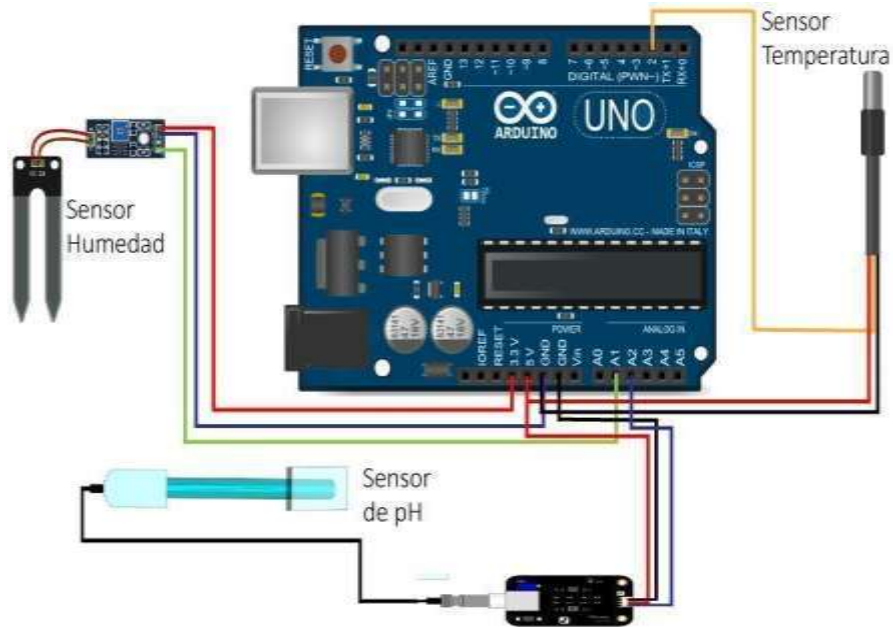
*Figura 2. Diseño al detalle biorreactor.
Fuente: Autores.*

Diseño conexiones placa Arduino ®

Para el monitoreo, se seleccionó el sistema de placa Arduino, como la ideal para el proyecto, ya que, es una plataforma de creación electrónica de código abierto (Arduino, 2021). En la figura 3 se presentan las conexiones y sensores implementados en la placa Arduino®. Se procedió a conectar los sensores al microcontrolador de la siguiente manera: el sensor de humedad se conectó a la entrada analógica A1, mientras que el sensor de pH se conectó a la entrada analógica A2. Por otro lado, el sensor de temperatura se configuró para utilizar una entrada digital en el puerto 2, como se muestra en la figura 3.

Los sensores tienen conexiones positiva (rojo) y negativa (negro); el rojo representa la entrada de la energía al proceso con un voltaje de 3.3 V o 5 V, el negro es un polo a tierra (de ahí la abreviatura GND) (Descubre Arduino ®; 2014) que es una vía de retorno común de la corriente hacia la fuente eléctrica, y así permite que el circuito se complete (Isaac, 2021), en el anexo 2 se relacionan al detalle cada elemento usado para las conexiones de la placa arduino.

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH.
marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.



*Figura 3. Conexiones en placa Arduino.
Fuente: Autores.*

Los datos recolectados por los sensores se almacenaron en una tarjeta SD, a través de un Shield SD card para-Arduino ®; mientras que, la lectura se dio en una pantalla de cristal líquido incorporada a la placa (LCD keypad shield), las especificaciones de cada uno de los elementos usados se encuentra en el anexo 2.

Programación del sistema de monitoreo Arduino®

El monitoreo automatizado requiere el desarrollo de un código de programación que le permita a la placa Arduino® captar las señales, almacenar los datos y registrar las variaciones en los sensores. La Figura 3 presenta el algoritmo de programación de la estructura base del código desarrollado (pseudocódigo) para cada sensor, en el (ANEXO 1), así mismo para cada uno de ellos se realizó la calibración de estos, de acuerdo con sus voltajes esto se puede ver al detalle en el anexo 3 donde se encuentra al detalle la calibración realizada para cada sensor.



Figura 4. Algoritmo básico Arduino®

Fuente: Autores.

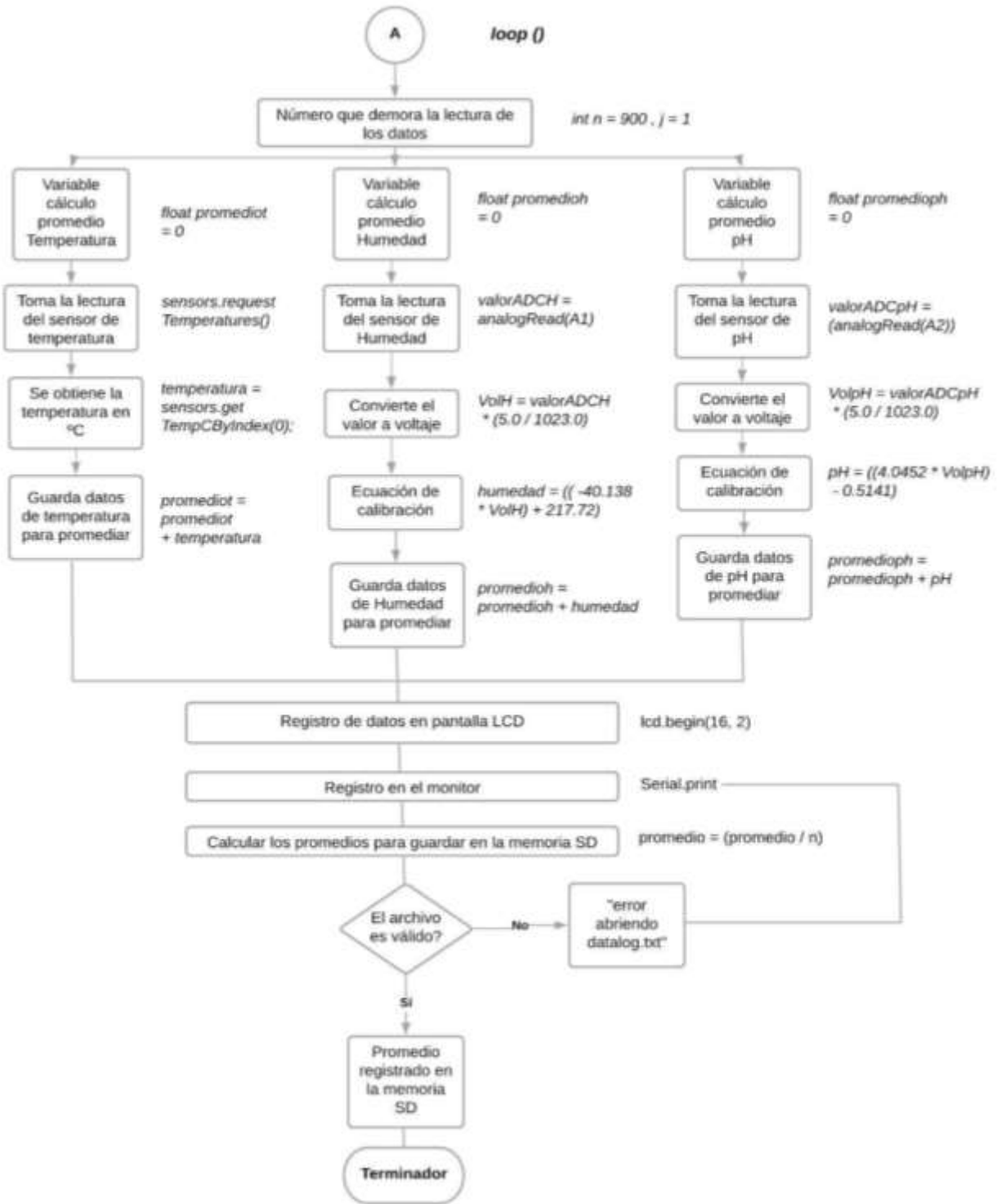


Figura 5. Algoritmo básico Arduino®

Fuente: Autores.

Evaluación del compostaje en biorreactor

Se determinaron características fisicoquímicas en los tres ensayos del estudio tomando muestras aleatorias del sustrato y analizando en las instalaciones del laboratorio de Química de la Universidad ECCI Sede P.

Por otra parte, se efectuó un seguimiento continuo del sustrato *in situ* a través del sensor de humedad del suelo yl-100, el sensor de pH analógico DFROBOT y el sensor de temperatura DS18B20 para Arduino® se realizó la evaluación del biorreactor por medio de un monitoreo automatizado con sensores Arduino®, adicionalmente se evaluaron tres puntos de referencia dados por análisis fisicoquímicos.

Metodología

Determinación de Materia Orgánica (método calcinación). IGAC (IN-AGR-PC01-51).

La determinación de la materia orgánica se ejecutó a través del método de calcinación publicado por el IGAC (2015) en el cual se ejecutaron modificaciones, se pesó una muestra de 10 g de material orgánico homogéneo y se ingresó al horno eléctrico tipo mufla marca Cientec a una temperatura de 540 °C por 24 h. Una vez completo el tiempo se dejó enfriar la muestra, y se procedió a pesar el residuo del proceso de calcinación en balanza analítica marca Wincom.

El cálculo de la materia orgánica se realizó a través de la ecuación (1), a partir de este resultado se determinó el nitrógeno total con la ecuación (2).

$$MO\% = \frac{(MO\ BH*100)}{Pms} \quad (1)$$

$$Nt = \frac{MO}{20} \quad (2)$$

Fuente: IGAC (2006).

Determinación del Contenido de Humedad (Método cuantificación gravimétrica). IGAC (IN-AGR-PC01-50).

Para calcular el contenido de humedad se utilizó el método gravimétrico, ya que es el único método directo de medición de la humedad del suelo, establecido y actualizado por el IGAC (2022). Este método consiste en tomar una muestra de suelo de 10g, pesar antes y después de su desecado para calcular su contenido de humedad.

Se procedió a secar la muestra durante 24 h a 105 °C en el horno marca BINDER, sin tapar para asegurar la completa eliminación de humedad y obtener un peso constante, se introduce la cápsula al desecador y se pesó en la balanza analítica marca Wincom, con los datos obtenidos se cuantifica el porcentaje de humedad con la ecuación (3)

$$pw(\%) = \frac{(Pmh - Pc) - (Pms - Pc) * 100}{(Pms - Pc)} \quad (3)$$

Fuente: IGAC (2006).

Determinación de pH. (potencial de hidrógeno). IGAC (IN-AGR-PC01-31).

La determinación del pH se realizó a través del método potenciómetro modificado, en el cual se realiza una mezcla con relación 1:1, 50% agua y 50% muestra de suelo homogeneizado, dejando reposar por 2 minutos. Luego se agitó la mezcla y se introdujo un electrodo, el cual indica una lectura de pH con el equipo GroLine. HI 981030 – HANNA Instruments.

Determinación del Carbono Orgánico por el Método Walkley - Black. IGAC (IN-AGR-PC01-52).

Para ejecutar el cálculo de Carbono Orgánico se siguió la metodología Walkley - Black. Establecida por el IGAC (2022). En ella se establece diferentes etapas de cuantificación, iniciando en el pesaje de 0,2 g de suelo seco y tamizado 2 mm previamente. Simultáneamente, se preparó un blanco de proceso (Bp) a las dos muestras, se adicionó 5 ml de la solución de dicromato de potasio 1N y 5 ml de ácido sulfúrico concentrado, agitando suavemente.

Inmediatamente, se agregó el ácido sulfúrico concentrado, agitando vigorosamente la mezcla durante 30 s, para adicionar 0,2 g de fluoruro de potasio, se dejó en reposo por 15 minutos bajo campana de extracción, para posteriormente adicionar 7 gotas de indicador de difenilamina y proceder a efectuar la titulación con sulfato ferroso en una concentración de 1N hasta el cambio en coloración de la solución de marrón a verde, obteniendo así, los datos para la ecuación (4)

$$\%C.O = \frac{(Bp-M)*N*0,003*(100+pw)}{pm} \quad (4)$$

Fuente: IGAC (2006).

Resultados

La construcción del prototipo de biorreacción consistió en los materiales descritos en la tabla 4, de acuerdo con ello, se realizó la adecuación de caneca para cumplir con las condiciones establecidas en la tabla 2, en términos de aireación y drenaje, para ello se realizó la adecuación de un instrumento plástico que permite el drenaje de los lixiviados, así mismo se adecuó una apertura inferior encajada con una llave.

Para el sistema de monitoreo Arduino se ajustó una caja protectora del sistema, de allí se instalaron las respectivas conexiones y sensores expuestos en la figura 3, en las respectivas posiciones sugeridas en la tabla 2. Se procedió a homogeneizar el material disponible en la planta y establecer un peso comparativo entre la pila piloto y el biorreactor de aproximadamente 100 kg.

Se agrega el material en una bolsa plástica simulando una pared adicional dentro del biorreactor, ya que las pilas tradicionales se cubren de la misma manera, para evitar la pérdida de humedad, de acuerdo con esto se procede a agregar el sistema de aireación adicional en el biorreactor, abriendo orificios pequeños en un tubo de PVC que sobresale, el cual se ubica en el centro del sistema, se procede a tapar la caneca principal y se procede a iniciar el sistema de monitoreo Arduino, conectando en una corriente eléctrica de 110V cercana a la zona de instalación del prototipo.

Con el propósito de verificar los datos obtenidos en el monitoreo automatizado del Sistema Arduino ® se realizaron visitas semanales para recolectar los datos y medir las variables del

sistema, así como para conocer el desarrollo del biorreactor. De manera tal que se obtuvieron los siguientes resultados de los principales parámetros analizados (pH, temperatura y humedad).

Análisis Comportamiento (Temperatura Y Humedad). Monitoreo Automatizado Arduino ®

Teniendo en cuenta la evolución del proyecto se establecen 3 ensayos en la toma de datos con el sistema Arduino®, el ensayo 1 (Semana 1 a 4) consiste en la construcción del diseño inicial, el ensayo 2 (Semana 5 a 10) contempló el retiro del plástico interno e instalación de un aislante térmico.

El ensayo 3 (Semana 11 a 22) implicó el cambio del sensor de humedad, volteo, mezcla del material y la aplicación de fermento a base de melaza, cerveza e Inoculo Microbial Para Compostaje - 250 ml (confiabonos Sas).

En vista de que el compostaje es un proceso biológico llevado a cabo por microorganismos, se deben tener en cuenta los parámetros que afectan su crecimiento y reproducción (FAO, 2013), se realizó una evaluación de la temperatura y pH semanal (Figura 6)

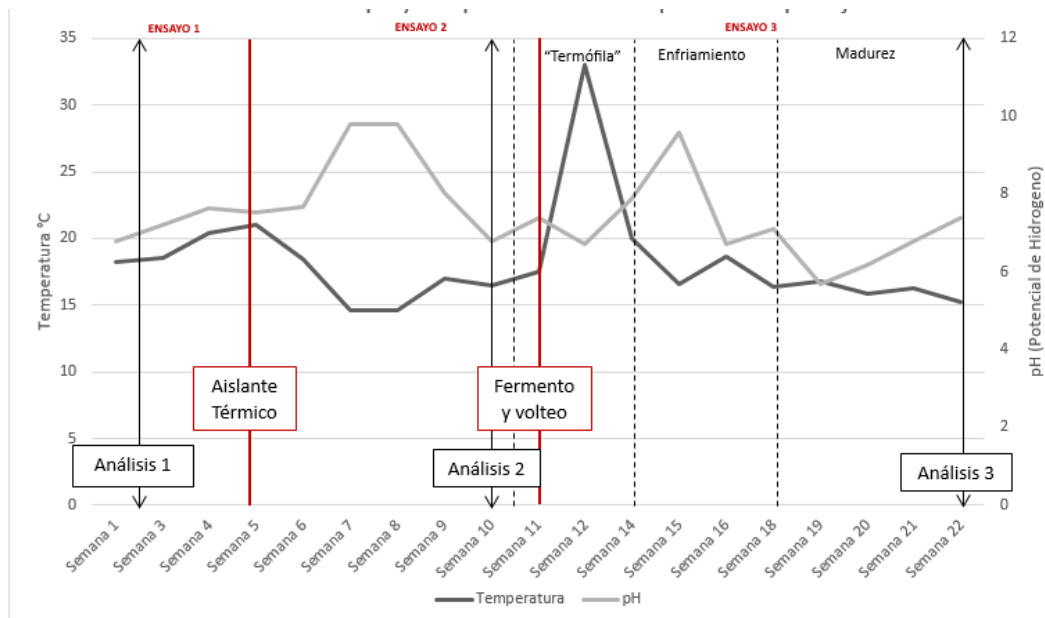


Figura 6. Evaluación de la temperatura y pH durante las diferentes etapas del compostaje.

Fuente: Autores.

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH. marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.

Ensayo 1

Durante el primer ensayo (Semana 1 a 4) se observó que la temperatura no presentó gran variación, encontrándose en rango de 25 a 15 °C, es decir, a temperatura ambiente, por otro lado, el pH se encontró en un promedio de 7,3 un valor neutro, sin embargo, en las primeras semanas debe haber una fase de acidificación por ende se dificultó el alcance de la fase mesófila y de la fase termófila. Al evidenciar que no se alcanzó temperaturas superiores a los 25 °C y que, por el contrario, descendió con el paso de las semanas, se planteó ejecutar unas modificaciones al diseño inicial, continuando con el ensayo 2.

Ensayo 2

Para el segundo ensayo (Semana 5 a 10) Con la implementación del aislante térmico (Figura 7b) y el retiro del plástico interno, se observó una mejoría durante los primeros registros de sistema de monitoreo, dado que se alcanzaron temperaturas alrededor de los 25 °C, sin embargo, con los seguimientos semanales y el análisis de los datos obtenidos, se presentó nuevamente un descenso de la temperatura, alcanzando puntos mínimos de aproximadamente 13 °C y el pH se mantuvo en un promedio de 7,5, es decir que, según lo expuesto previamente tampoco cumplió con lo establecido para la fase mesófila.

Ensayo 3

Al ver el poco avance, se retiró todo el material del biorreactor para realizar volteo manual, no se realizó el cambio de material ya que según recomendaciones del Manual de compostaje de la FAO lo recomendado es realizar volteos para incrementar la porosidad y disminuir la humedad; adicionalmente se preparó un fermento a base de melaza, cerveza y microorganismos eficientes con el fin de incrementar la actividad microbiana y contribuir en las fases del proceso de compostaje dando paso al último ensayo (Semana 11 a 22), donde efectivamente se vio una mejoría, ya que partiendo de la solución propuesta se alcanza un pico en el sistema, alcanzando una temperatura máxima de 33 °C; sin embargo, no se mantuvo por más de una semana, el pH no presentó una variación significativa.

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH.
marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.

Puesta en marcha y evaluación del prototipo

Se cree que algunas condiciones del ambiente y del diseño del prototipo (Figura 7a) tal como el área superficial comparado con el volumen del sustrato, dio lugar a que la temperatura del entorno tuviera efecto sobre las condiciones internas del sustrato y, por tanto, del proceso de compostaje.

Teniendo en cuenta que el material del biorreactor (Polietileno de alta densidad) cuenta con una conductividad térmica de $0,44 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (Araújo, J. R.; Waldman, W. R. y De Paoli, M. A., 2008) que, comparado con un material común como el acero que generalmente es usado para la construcción de biorreactores en compostaje ($k = 45 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) (Jansen Iberia, 2022) se pudo deducir que el material elegido para el diseño inicial, al no presentar una alta conductividad térmica, no tuvo un efecto importante en relación con una posible pérdida de calor, visibilizada a través de la temperatura registrada por el sistema. Sin embargo, se incorporó un aislante térmico (Figura 7b) con miras a superar esta situación, aun así no se evidenció cambios significativos (anexo 4).

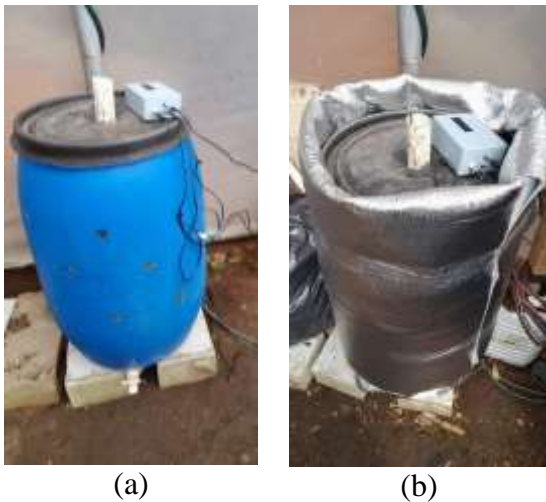


Figura 7. Biorreactor Ensayo 1 (a) y Ensayo 2 (b)

Análisis Físicoquímico

En la tabla 5 se presentan los resultados de los parámetros físicoquímicos evaluados (M.O, C.O, N, pH y relación C/N) en laboratorio por cada análisis realizado en diferentes semanas del

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH. marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.

proyecto, parámetros que según el manual de compostaje de la FAO (2013) son los más relevantes para tener en cuenta en el proceso de compostaje.

Tabla 5. Análisis Físicoquímico.

<i>Parámetro</i>	Análisis 1 Semana 2	Análisis 2 Semana 10	Análisis 3 Semana 22
H (%)	10	52	28
M.O (%)	23	86	26
C.O (%)	56	37	20
N (%)	1	4	1
pH	7	8	7
C/N	48,2:1	8,8:1	15,8:1

Fuente: Autores.

Como se mencionó anteriormente, En la tabla 5 se evidenció los 3 puntos de referencia en los cuales se realizó las caracterizaciones físicoquímicas del material, cabe destacar que al emplear el aislante térmico se continuó con el mismo sustrato cargado en la semana 2 (Análisis 1), así mismo en la semana 10 (Análisis 2) se realizó la aplicación del fermento al mismo sustrato, sin embargo, se incorporó más material para alcanzar la capacidad completa del biorreactor, por lo tanto, este análisis se puede considerar una muestra inicial de ingreso al sistema y el ensayo 3 (semana 22), el análisis final y salida del material.

Por otro lado, encontramos la tabla 6, donde se realizó una comparación bibliográfica de los parámetros evaluados en este documento (Tabla 1) y teniendo en cuenta que el material de ingreso al sistema, al ser a base de celulosa, cuenta con una humedad baja en comparación a un material orgánico de alimentos y condiciones similares al presente estudio.

La primera revisión bibliográfica es la investigación previa ejecutada por Rincón, T (2021) donde se ejecuta la caracterización físicoquímica del compost producido en las mismas instalaciones en el campus de la Universidad ECCI bajo las mismas condiciones, pero en sistema tradicional de pilas abiertas y con diferentes etapas de muestreo.

Se revisa otro estudio realizado por Martínez, J., & Suarez, H. (2022, 75-90) en donde se compara el proceso de compostaje por medio de un reactor horizontal. Adicionalmente, se ejecutó una

valoración de parámetros de acuerdo con la norma NTC 5167 (2004), Esta norma tiene por objeto establecer los requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben ser sometidos los productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y como enmiendas de suelo la cual establece los rangos en los que se deben encontrar cada uno de los parámetros para catalogar el abono como un fertilizante orgánico.

Tabla 6. Análisis Físicoquímico de estudios similares

<i>Parámetro</i>	<i>Ensayo</i>	<i>Rincón T. 2021</i>	<i>Martínez J., & Suárez, H. 2022</i>	<i>NTC 5167</i>
H (%)	Inicial	9	83,1	-
	Final	61	31,2	< 35
M.O (%)	Inicial	67	-	-
	Final	22	-	-
C.O (%)	Inicial	22	5,17	-
	Final	13	-	> 15
N (%)	Inicial	3	0,25	-
	Final	1		< 1
pH	Inicial	5	5,69	-
	Final	6	6,53	7
C/N	Inicial	6,5:1	21:1	-
	Final	11,7:1	7,86:1	-

Fuente: Autores.

De acuerdo con los resultados de la Tabla 5 y respecto a los datos presentados en la Tabla 6, se logró confrontar cada parámetro para un producto con un periodo de degradación de 22 semanas. Por otro lado, Rincón T. (2021) usó el mismo material en una pila de compostaje tradicional con un tiempo de degradación aproximado de 14 semanas, sin embargo, a pesar de tener condiciones similares las cuales se pueden contrastar, no asegura el comportamiento homogéneo en el sistema, ya que las salidas pueden variar de acuerdo con la manipulación y condiciones de degradación física.

Adicional, la muestra inicial no contaba con la humedad necesaria para que los microorganismos desarrollarán la degradación del material tanto en las pilas tradicionales como en el biorreactor,

sin embargo, en la segunda caracterización la humedad se estabilizó, descendiendo en el último análisis al 28% para considerarse dentro de los rangos sugeridos en la NTC 5167, humedad < 35% no obstante, no pasó por la etapa higienización e inocuidad.

Así mismo, se comparó con el valor de un sistema tradicional de pilas abiertas (Rincón T. 2021, p. 45- 60), puesto que cuenta con un material de entrada similar al del biorreactor, deduciendo que este prototipo conserva la humedad al generarse evaporación, puesto que se encuentra el material orgánico menos expuesto a condiciones climáticas adversas, sin embargo, al mantener más humedad dentro del sistema, esta se puede ver afectada por excesos, dificultando el correcto proceso. Así mismo, el monitoreo automatizado permite tomar acciones correctivas en el sistema en términos de humedad.

Por consiguiente, los niveles de materia orgánica indican la disponibilidad de material a degradar, siendo este el suministro de energía para los microorganismos. (Casco, J. M., & Bernat, S. M. 2008, p. 17). Sin embargo, en la segunda caracterización y de acuerdo con la intervención realizada con el fermento aplicado, estos niveles de M.O aumentaron significativamente, como resultado esta llegó a un valor de 26%, el cual no varía significativamente respecto al estudio realizado por Rincón T. (2021) en un sistema de pilas tradicionales el cual llegó a un valor de 22%; por consiguiente, el sistema de biorreacción tardó mayor tiempo en estabilizarse, ya que se debe pasar necesariamente por todas las fases estipuladas en el manual de compostaje de la FAO (2013).

El carbono orgánico permite establecer los niveles de materia orgánica que se encuentran disponibles para los microorganismos presentes en las pilas de compostaje (Casco, J. M., & Bernat, S. M. 2008, p. 17-20). Conforme con la tabla 2, el biorreactor en su análisis inicial contaba con mayor actividad biológica al tener un valor superior al 50% de carbono orgánico, el cual a medida que transcurre el monitoreo desciende, ya que el material disponible para degradar va disminuyendo.

El biorreactor presentó un aumento significativo en el segundo punto de análisis, alcanzando un valor óptimo conforme a las condiciones de la FAO (2013) en donde indica que el nitrógeno debe estar en un rango de 0.3% y 1.5%. Por otra parte, Ayala Cadena, O. (2014), indica que el nitrógeno Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH. marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.

contribuye a conocer la relación C/N, conforme se genera la degradación de la materia orgánica, liberando dióxido de carbono que reduce la concentración de carbono e incrementa el porcentaje de nitrógeno dentro del compostaje (p. 26-30) de igual manera, el aumento de nitrógeno desmedido produce la liberación de amoníaco a la atmósfera. (Casco, J. M., & Bernat, S. M. 2008, p.17).

Discusión

Considerando que cada fase del compostaje está determinada por diferentes factores, se evidenciaron variaciones que no corresponden a la curva de evolución del proceso de compostaje.

En primer lugar, la temperatura, es uno de los parámetros más utilizados como indicador de la evolución del proceso de compostaje, ya que se relaciona de forma directa con la actividad microbiana, por ende, se evidenció que en el primer ensayo el escaso aumento de temperatura fue un claro indicativo de que no había proliferación de microorganismos (Tortosa Muñoz, G., 2011, p. 63) lo cual impidió la evolución de una fase termófila en los dos primeros ensayos y justificó la mejoría en el ensayo 3 cuando se inoculó el fermento y se realizó proceso manual de aireación, lo que ayudó a homogeneizar, estimuló la actividad microbiana y distribuyó aire por el material aumentando la porosidad, no obstante, no fue suficiente para prolongar la fase termófila y asegurar un producto final higiénico y de calidad.

En segundo lugar, el pH, es un parámetro que influye en gran medida en el desarrollo de las poblaciones microbianas durante el proceso de compostaje, se observaron picos de la semana 7 a la 9 y en la semana 15, estos valores están determinados por los componentes de la materia prima (Contenido en carbonatos, huesos o polvo de cemento, que aumentan el pH o restos de comida o acículas de pino, que bajan el pH) y por la acción de las poblaciones microbianas (Pastor Fernandez, 2019, p. 28).

Las bacterias descomponedoras prefieren un valor del pH en torno a 6,0-7,5, mientras que los hongos descomponedores prefieren valores más amplios, 5,5-8,0 (Cooperband, 2002). Sin embargo, el valor del pH no es constante, sino que va variando a lo largo del proceso debido a las sucesiones de las

poblaciones microbianas (Pastor Fernandez, 2019, p. 28). La descripción de los microorganismos que intervienen en el proceso de compostaje es complicada, debido a que las poblaciones y las comunidades varían continuamente en función de la evolución de la temperatura, nutrientes, oxígeno, contenido de agua, pH, etc. (Camacho, A., et al, 2014, p. 292). .

Así pues, teóricamente, en las primeras etapas del proceso el pH desciende, debido a que las poblaciones, fundamentalmente bacterianas, transforman complejos carbonatados en ácidos orgánicos. Posteriormente, el pH aumenta debido a la formación de amoníaco en la fase termófila, hasta un valor de 8,5 aproximadamente. Finalmente, en la última fase el pH desciende (en torno a 7,0) por amortiguación de la propia materia orgánica (Pastor Fernandez, 2019, p. 28).

Para este estudio, el pH se mantuvo en un promedio de 7,5, no obstante, presentó variaciones encontrando que cuando la temperatura descendió a sus puntos más bajos el pH se incrementó a sus puntos más altos (9,7) como se observa en la figura 6, esto confirma y según lo que afirma Pastor Fernandez (2019) que por encima de 7,5 se puede perder amoníaco gas o provocar la muerte prematura de poblaciones microbianas (p. 28), ya que este incremento del pH y la baja de temperatura se dio al inicio del proceso, este fue un factor de la baja actividad microbiana durante la investigación afectando los demás parámetros de control.

La construcción de biorreactores verticales sigue un principio general en el que el material compostable se dispone en forma de columna con alta cohesión del sustrato. Si no se gestiona adecuadamente, la presión generada por la columna puede compactar el sustrato, impidiendo la circulación de fluidos y dando como resultado zonas secas y zonas saturadas de agua, afectando la oxigenación también (Pastor Fernandez, 2019, p. 61-62).

Desde el punto de vista fisicoquímico, la elevada cohesión de la masa de materia orgánica facilita los aumentos de temperatura y tiene una mayor capacidad de retención de nutrientes y fluidos. De igual forma, como lo confirma Chandler *et al.* (2008) la aireación es fundamental para que la descomposición se lleve a cabo por la acción de los microorganismos presentes en el compost (p. 21), otro punto importante que no se tuvo en cuenta es el tamaño de la partícula y la homogeneización del material, ya que son dos factores fundamentales para que el proceso se inicie rápidamente y se produzca un incremento de la temperatura. Así, cuanto más pequeño es el tamaño del material, más

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH.
marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.

área habrá disponible para los microorganismos que degradan la materia orgánica (Tortosa Muñoz, G., 2011, p. 29).

El sustrato debe poseer una estructura física apropiada y un óptimo tamaño de partícula, de manera que se conjuguen diferentes aspectos, tales como máxima superficie expuesta al ataque microbiano y una porosidad que favorezca un adecuado intercambio gaseoso, interfiriendo directamente también en la humedad dando lugar esto último al predominio de las condiciones anaerobias en la masa de compostaje, lo que se traduce en fenómenos de putrefacción, malos olores, etc. (Tortosa Muñoz, G., 2011, p. 29 - 30).

Teniendo en cuenta estos factores, el desempeño del biorreactor se vio afectado por el tamaño de la partícula y escasa porosidad, lo cual favoreció su compactación y afectó la distribución de aire durante el proceso.

Conclusiones

Se ejecutó la caracterización de las propiedades fisicoquímicas de los residuos generados en el campus de la 170 de la Universidad ECCI, se encontró que en su mayoría son de tipo lignocelulósico, (hojarasca, césped, ramas) estos residuos son conocidos por tener bajo nivel de humedad y lenta degradación.

Se diseñó y construyó el prototipo de biorreacción; en cuanto a lo planteado, el material usado como recipiente no contó con una buena conductividad térmica y el aislante térmico no tuvo mayor efecto en la evolución de la curva de compost, la aireación tiene como objetivo regular la temperatura y el nivel de humedad de sustrato, sin embargo, esta no se mantuvo en niveles adecuados por el diseño, de igual forma se vio afectada por la homogeneización, tamaño de partícula y porosidad, lo cual ocasionó una compactación del material impidiendo el flujo de agua y oxigenación.

En cuanto a los sensores, el de temperatura no presentó ninguna falla a lo largo del proyecto, sin embargo, los sensores presentaron fallas por corrosión (humedad) y el sensor elegido para pH era para medios acuosos, por ende, no se obtuvo una lectura diaria de dicho parámetro, lo cual dificultó un análisis de datos más preciso.

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH.
marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.

Por otro lado, se comparó el comportamiento de degradación de un sistema de compostaje tradicional abierto con otras investigaciones previas en condiciones similares y el sistema de biorreacción; teniendo en cuenta el volumen y el tipo de residuo generado en el Campus, es conveniente el sistema tradicional de pilas, ya que, el biorreactor con el diseño expuesto en este estudio no tuvo un buen desempeño; puesto que presento muchas fallas las cuales afectan en el desarrollo correcto del proceso de compostaje, por ende, no se obtiene un producto final higiénico ni de calidad con este prototipo.

Al evaluar el desempeño del diseño del biorreactor construido para la producción de compostaje con monitoreo automatizado a través de sensores, se requiere de un análisis más detallado sobre las condiciones tanto externas como internas del lugar, ya que, son factores que impiden el correcto desarrollo del proceso de compostaje.

De acuerdo con esto, se identificó que el diseño de biorreactor expuesto en esta investigación no contó con las condiciones ideales de los parámetros anteriormente expuestos, por lo tanto, no cumple con las características adecuadas para la producción de compost con este diseño presentado respecto a una pila de compostaje tradicional, sin embargo, al tener en cuenta todo lo mencionado previamente, se puede construir un diseño que se adapte a las condiciones necesarias para el proceso de compostaje.

Recomendaciones

Considerar dentro del diseño de biorreacción aspectos tales como: el material de construcción que favorezca el mantenimiento y control de los parámetros que se quieran estudiar, la aireación es fundamental en el diseño, ya que puede evitar compactaciones, baja porosidad, acumulación de humedad, malos olores, etc.

En cuanto al sistema de monitoreo, es necesario evaluar el tipo de análisis estadístico que se quiere realizar con el fin de determinar el equipo necesario para validar datos con registro de fecha hora contemplando cortes de energía, y otros factores que puedan afectar la toma de datos como el tipo de sensor para cada parámetro, por ejemplo para la humedad es necesario un sensor de calidad que

evite la corrosión en contacto con el material y en cuanto al pH que permita modelación del parámetro de forma continua en caso de no requerir mano de obra para la toma del dato.

Es necesario un buen equilibrio entre los aumentos y disminuciones del pH para que el proceso se lleve a cabo de forma adecuada y no haya pérdidas de nutrientes, de igual forma la cuantificación de los residuos, el establecimiento inicial del tamaño de partícula ideal para que no afecte la porosidad del producto.

Declaración de Conflicto de Intereses

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Agradecimientos

A la Universidad ECCI por los recursos para este estudio. A los docentes, Carolina Hernández, Erika Fonseca y Frank García, por las contribuciones, críticas y sugerencias hechas para llevar a cabo el proceso y la investigación.

Referencias Bibliográficas

Araújo, J. R.; Waldman, W. R.; De Paoli, M. A. (2008). «Thermal properties of high-density polyethylene composites with natural fibres: Coupling agent effect». *Polymer Degradation and Stability* 93 (10): 1770-1775. ISSN 0141-3910. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2008.07.021.

Astudillo Serrano, M. V., & Cadena Sánchez, J. L. (2016). Desarrollo de un prototipo para el seguimiento y cuidado de jardines urbanos basado en la recopilación de datos a través de la plataforma de Arduino® (Bachelor's thesis, PUCE).

Ayala Cadena, O. (2014). Prototipo de un compostador de uso doméstico automatizado con Arduino.

Bardales Vásquez, C., Cabos Sánchez, J., León Torres, C., & Jara Huacacolqui, E. (2020). Enriquecimiento proteico de los principales residuos lignocelulósicos agroindustriales de la Región La Libertad con la asociación mixta de *Trichoderma reesei*, *Chaetomium cellulolyticum* y *Candida utilis* para alimentación animal. *Arnaldoa*, 27(1), 99-114. <https://dx.doi.org/10.22497/arnaldoa.271.27104>

Camacho, Alejandro D., Martínez, Laura, Ramírez Saad, Hugo, Valenzuela, Ricardo, & Valdés, María. (2014). Potencial de algunos microorganismos en el compostaje de residuos sólidos. *Terra Latinoamericana*, 32(4), 291-300.

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

Carmona Pardo, R. N. (2017). Estudio de las propiedades fisicoquímicas de compost de residuos sólidos orgánicos residenciales, a partir de su caracterización térmica

Cooperband L, 2002. University of Wisconsin-Madison. Center of Integrated Agricultural Systems. 2002. "The Art and Science of Composting. A resource for farmers and compost producers".

Chandler, C., Ferrer, J., Mármol, Z., Páez, G., Ramones, E., & Perozo, R. (2008). Efecto de la aireación en el compostaje del bagacillo de la caña de azúcar. *Multiciencias*, 8(1), 19-27.

Chaparro Montenegro, D. A. & Zorro Millán, J. D. (2017). Prototipo De Biorreactor Aerobio Para El Monitoreo Y Control Del Proceso De Compostaje, A Partir De Lodos De Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales Y Residuos Sólidos Orgánicos De Plaza De Mercado Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH. marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.

Universidad Pedagógica Y Tecnológica De Colombia Facultad De Ingeniería Escuela De Ingeniería Electrónica Tunja.

CIEMAT. (2000). Reporte de investigación Producción y gestión del compost.

Cruz Cal, B. R., Hernández Touse, J. P., Machado Benavides, S., Alfonso Blanco, R., Leiva Mas, J., & Espinosa Pedraja, R. O. (2022). Mecanismos de Transferencia de Calor.

FAO., (2013) Manual de Compostaje del Agricultor, Experiencias en América Latina. "Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura." ("Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura") Santiago de Chile.

García, A. (2008). La materia orgánica (MOS) y su papel en lucha contra la degradación del suelo. In Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Quito, Ecuador, Memorias (Vol. 18).

García, M.; R. Quintero & A. López. 2007. Biotecnología alimentaria. México D. F.: Limusa.

Gillespie E., (s.f.) Biorreactor de compost. SFGATE.

Gómez Barrera, R., (2006) Compostaje de residuos sólidos orgánicos. Universidad autónoma de Barcelona

Gotaas, H.B. (1956). Composting. Sanitary disposal and reclamation of organic wastes. World Health Organization. Geneva.

Han, J. (2008). "Properties of non Wood Fibers", USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison WI 53705-2398. USA. Instituto Peruano del Espárrago. 2004. Primer censo nacional de productores y plantas de procesamiento de espárrago. Lima. Perú.

Hoyos, J. L., Vargas, C. A., & VELASCO, R. J. (2010). Evaluación de compost obtenido en pila móvil empleando mezclas de gallinaza de jaula con material celulósico. Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial, 8(1), 54-60.

IBM Documentation. (2023). Nivel de Significación.

IGAC (2006). Métodos analíticos de laboratorio de suelos. 6ª edición. República de Colombia.

Instituto Colombiano Agropecuario – I.C.A., (2003). Resolución No. 00150. Reglamento Técnico de Fertilizantes y Acondicionadores de Suelos para Colombia.

Jansen Iberia. (2022). Conductividad térmica. ¿Qué tiene que ver en el acero? | Jansen. Jansen. <https://jansen.es/conductividad-termica->

Rincón T. (2021). Caracterización Físicoquímica y Estandarización Del Compostaje Producido A Partir De Los Desechos Orgánicos y De Poda Generados En El Campus De La Universidad Ecci Ubicada En Bogotá, Autopista Norte, Calle 170. República de Colombia.

Rojas Perez, F., Zeledón Vílchez, E. (2007) Efecto De Diferentes Residuos De Origen Vegetal Y Animal En Algunas Características Física, Química Y Biológica Del Compost. Hacienda Las Mercedes, Managua. 2005.

Rolle, K. C. (2006). Termodinámica. Pearson Educación.

Ruiz Gutiérrez J. (2007) Arduino®: Manual de Programación. Guía rápida de referencia.

Ruíz-Leza, H. A., Rodríguez-Jasso, R. M., Rodríguez-Herrera, R., Contreras-Esquivel, J. C., & Aguilar, C. N. (2007). Diseño de biorreactores para fermentación en medio sólido. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 6(1), 33-40.

Martínez Urueña, J. P., & Suarez Parra, H. (2022). Propuesta para elaboración de abono a partir de compostaje teniendo en cuenta la inclusión de una mezcla de microorganismos en el proceso (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América).

Márquez, P. B., Blanco, M. J. D., & Capitán, F. C. Capítulo 4. Factores que afectan al proceso de Compostaje. Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva.

Pastor Fernández, C. (2019). Proyecto de Diseño de un Biorreactor para la Producción de Compost a partir de Biorresiduos.

Sztern D & Pravia M., (s.f.) Manual Para La Elaboración De Compost, Bases Conceptuales Y Procedimientos. Organización Panamericana De La Salud.

Sancho, J. R. (2008). Manual de compostaje. España: Amigos de la tierra.

Torres Uquillas, A. I. (2021). Elaboración y producción de abonos orgánicos enriquecidos para su empleo en agricultura ecológica en la parroquia Calpi.

Tortosa Muñoz, G. (2011). Elaboración a escala preindustrial de enmiendas y abonos orgánicos sólidos y líquidos mediante co-compostaje de orujo de oliva de dos fases o “alperujo”.

UAESP. (2014). Guía técnica para el aprovechamiento de residuos orgánicos a través de metodologías de compostaje y lombricultura. Bogotá

Vargas Pineda, O. I., Trujillo González, J. M., y Torres Mora, M. A. (2019). El compostaje, una alternativa para el aprovechamiento de residuos orgánicos en las centrales de abastecimiento. Orinoquia, 23(2), 123-129

ANEXOS

ANEXO 1. CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN PLACA ARDUINO®

```
#include <SPI.h>
#include <SD.h>//Librería memoria SD
#include <LiquidCrystal.h> //Permite comunicación el LCD pantalla
#include <OneWire.h> //Permite comunicación con el sensor de temperatura
#include <DallasTemperature.h>//Permite comunicación con el sensor de temperatura
//-----PANTALLA LCD-----
LiquidCrystal lcd(8, 13, 9, 4, 5, 6, 7);
const int chipSelect = 4;
int m = 1;//Variable contadora
//-----SENSORES-----
//Variables globales sensor de temperatura
  OneWire ourWire(2);//Se establece el pin digital 2 como bus OneWire
  DallasTemperature sensors(& our Wire); //Se declara una variable u objeto para el sensor de
temperatura
  float temperatura = 0;
//Variables globales sensor de humedad
  int valorADCH = 0;
  float humedad = 0;
  float VolH = 0;
//Variables globales sensor de pH
  int valorADCpH = 0;
  float VolpH = 0;
  float pH = 0;
//-----Inicio-----
void setup() {
//Se inicia la comunicacion serial
  Serial.begin(9600);
//Se inicia el sensor de temperatura
```

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH.
marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.

```

sensors.begin();
//Inicia comunicacion con la memoria SD
Serial.print("Iniciando memoria SD...");
// see if the card is present and can be initialized:
if (!SD.begin(chipSelect)) {
  Serial.println("La memoria no esta presente");
  // don't do anything more:
}
else {
  Serial.println("La memoria se ha iniciado.");
}
Serial.println("No; Temperatura °C; Humedad %; pH");
File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
if (dataFile) {
  dataFile.println("Inicia registro de datos...");
  dataFile.println("No; Temperatura °C; Humedad %; pH");
  dataFile.close();
}
// if the file isn't open, pop up an error:
else {
  Serial.println("error no se inicio el archivo datalog.txt");
}
}
//-----Ciclo-----
void loop() {
  int n = 900 , j = 1;//Numero que demora la lectura de los datos
  float promedih=0;//Variable calculo proemdio humedad
  float promediot=0;//Variable calculo proemdio temperatura
  float promedioph=0;//Variable calculo proemdio pH
//Demora la cantidad de tiempo que queremos entre lecturas e imprime en el lcd
  for(int i = 0; i<n; i++){

```

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH.
marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.


```

//Toma la lectura del sensor de Temperatura
sensors.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura
temperatura = sensors.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C
promediot = promediot + temperatura;//Guarda datos de temperatura para promediar
//Toma la lectura del sensor de Humedad
valorADCH = analogRead(A1);
humedad = constrain(valorADCH,0, 1023);
humedad = map(valorADCH,0,1023,100,0);
//VolH = valorADCH * (5.0 / 1023.0);//Convierte el valor a voltaje
//humedad = (( -40.138 * VolH) + 217.72);//Ecuacion de calibracion Humedad
promedioh = promedioh + humedad;//Guarda datos de humedad para promediar
//Toma la lectura del sensor de pH
valorADCpH = (analogRead(A2));
VolpH = valorADCpH * (5.0 / 1023.0);//Convierte el valor a voltaje
//pH = (3.5 * VolpH);
pH = ((4.0452 * VolpH) - 0.5141);//Ecuacion de calibracion pH
promedioph = promedioph + pH;//Guarda datos de pH para promediar
// Registro de datos en pantalla LCD
lcd.begin(16, 2);//Configura el número de columnas y filas de la pantalla LCD:
lcd.setCursor(0,0); //Ubica el cursor a la columna 0, fila 0
lcd.print("T:");
lcd.print(temperatura,1);
lcd.print(" H:");
lcd.print(humedad,1);
lcd.print("%");
lcd.setCursor(0,1); //Ubica el cursor a la columna 0, fila 1
lcd.print("pH:");
lcd.print(pH,1);
// Registro de datos en el monitor
Serial.print(j);
Serial.print(" ");

```

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH.
marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.

```

Serial.print(temperatura,1);
Serial.print("; ");
Serial.print(humedad,1);
Serial.print("; ");
Serial.println(pH,1);
j = j + 1;
delay(1000); //tiempo de espera, el numero de milisegundos entre las lecturas del sensor. 1000
es igual a 1 segundo
}
//Calcula el promedio para guardar en la memoria SD
promedioh = (promedioh / n); //promedia los datos de humedad
promediot = (promediot / n); //promedia los datos de temperatura
promedioph = (promedioph / n); //promedia los datos de pH
// if the file is available, write to it:
File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
if (dataFile) {
dataFile.print(m);
dataFile.print(";");
dataFile.print(promediot,1);
dataFile.print(";");
dataFile.print(promedioh,1);
dataFile.print(";");
dataFile.println(promedioph,1);
dataFile.close();
// print to the serial port too:
Serial.println(" Promedio registrado en la memoria SD...");
m = m + 1;
}
// if the file isn't open, pop up an error:
else {
Serial.println("error opening datalog.txt");

```

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH.
marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.

}

ANEXO 2. Especificaciones del biorreactor y Placa De Monitoreo Arduino®

Especificaciones del Biorreactor

Tubo PVC (Sistema de Aireación).

De acuerdo con las puntuaciones de la tabla 6. Se establece como un método económico y efectivo la aireación superior, central e inferior, que permita el flujo del aire de forma continua en el dispositivo, esto favorece el aporte de oxígeno en el compostaje.



Además de permitir el control de la temperatura, la eliminación de agua y la evacuación de CO₂ y otros gases generados durante la biodegradación de la materia orgánica.

El sistema de aireación está compuesto por un tubo en PVC (Policloruro de vinilo) una combinación química de carbono, hidrógeno y cloro. Sus componentes provienen del petróleo bruto (43%) y de la sal (57%). Es un material ligero y químicamente inerte e inocuo, además de contar con propiedades de los termoplásticos, es decir, bajo la acción del calor (140 a 205 °C) se reblandece, pudiendo moldearse fácilmente; cuando se enfría recupera la consistencia inicial conservando la nueva forma, favoreciendo la relación Calidad/Precio en el sistema; este mismo va a estar compuesto por unos agujeros de 10 cm de diámetro para contribuir el paso del aire en el sistema. (ASOVEN; 2018).

Tapa Caneca de Biorreacción



La caneca de biorreacción cuenta con una tapa de plástico, la cual permite sellar el sistema, contribuyendo a preservar la humedad y temperatura de todo el sistema.

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH.
marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.

Caneca de Biorreacción

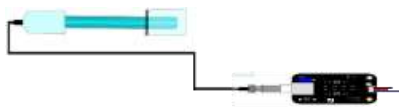


Así mismo, en las paredes del biorreactor cuentan con unos orificios de forma circular, los cuales tienen un diámetro de 10 cm, los cuales estarán alrededor de la caneca en la parte superior e inferior.

Promoviendo el proceso de aireación, el cual se dará de forma más homogénea de esta manera, ya que una insuficiente aireación, provoca un retardo en el proceso de compostaje, los cuales pueden generar malos olores.

Así mismo la caneca está compuesta por plástico, este sistema de biorreacción permite tener condiciones sanitarias óptimas al ser un ambiente controlado con poca transpiración, contribuyendo al buen funcionamiento y desarrollo del compostaje.

A. Sensor de pH



El sensor de pH se encuentra introducido en una ranura individual en un punto medio de la caneca, este mismo va conectado por medio de un cable el cual se conecta para conducir 3 cables, los cuales se dirigen a la caja de conexiones, permitiendo la medición automática de este parámetro.

B. Sensor de Temperatura

El sensor de Temperatura se encuentra introducido en una ranura individual en un punto medio de la caneca, este mismo va conectado por medio de 3 cables, los cuales se dirigen a la caja de conexiones, permitiendo la medición automática de este parámetro.



C. Sensor de Humedad



El sensor de Humedad se encuentra introducido en una ranura individual en un punto medio de la caneca, este mismo va conectado por medio de 2 cables que generan interconexión a 3 cables, los cuales se dirigen a la caja de conexiones, permitiendo la medición automática de este parámetro.

D. Rejilla en Acero Inoxidable

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH.
marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.



La rejilla de acero se encuentra ubicada en la parte inferior de la caneca de biorreacción, esto con el fin de sostener el contenido másico y permitir el paso de lixiviados, oxígeno u otro tipo de componentes que pueden evitar el buen funcionamiento del biorreactor, su material permite que sea duradero además de no afectar el producto final.

E. Caja de Conexiones



La caja de conexiones nos permite preservar en buenas condiciones el sistema de monitoreo, ya que en esta se encuentra la placa Arduino, con las respectivas conexiones a los sensores.

La caja de conexiones presenta una resistencia adecuada al ser de plástico, evitando la filtración de humedad u otro tipo de sustancias que puedan afectar el sistema, así mismo esta se encuentra atornillada a una base de acero inoxidable, para mantener su estabilidad evitando posibles alteraciones.

F. Cableado

El sistema de cableado se va conectando entre el sistema de sensores y la caja de conexiones, este



mismo se encuentra expuesto por fuera de la caneca de biorreacción, sin embargo, no representa ningún riesgo para el dispositivo, ya que estos resisten factores ambientales, puesto que sus conexiones se encuentran protegidas.

G. Llave en Acero Inoxidable

La llave de acero inoxidable permite el drenaje de posibles lixiviados en la parte inferior de la caneca de biorreacción, así mismo se espera que algunos de estos lixiviados se puedan evaporar



manteniendo la humedad estable dentro del dispositivo, esta llave debe ir asegurada de manera estable por medio de un empaque.

H. Soporte en Acero



El soporte en acero permite que el biorreactor se encuentre estable, además de contribuir a la correcta extracción de lixiviados al ser un material resistente, adicionalmente brinda estabilidad en la caja de conexiones permitiendo que el sistema se encuentre fijo manteniendo el monitoreo automatizado.

Especificaciones de Placa De Monitoreo Arduino®

LCD keypad shield para-Arduino®

La LCD Keypad Shield para Arduino® es un módulo externo el cual sirve para la visualización de texto (datos) en una pantalla lí-queda, describiendo la información que se encuentre procesando la board arduino ®programable. (Vistronica, 2022).

Esta board se ha desarrollado para proporcionar una interfaz fácil de usar que permita a los usuarios navegar por el menú, hacer selecciones, entre otras. Consta de una pantalla LCD 16X2 de retroiluminación. El display es compatible con el controlador HD44780 y está conectado en modo de 4 bits (pines digitales 8, 9, 4, 5, 6, 7), por lo que se puede utilizar directamente mediante la biblioteca de Arduino® LiquidCrystal. El teclado dispone de 5 botones distribuidos de la siguiente manera: seleccionar, arriba, abajo, derecha e izquierda. Para una mejor administración de los pines digitales de entrada/salida, la interfaz de teclado emplea solo un canal ADC.(Vistronica, 2022).



Especificaciones Pantalla LCD 1602 Display Shield Lcd 16x2:

Pin=Function

Analog 0 = Button (select, up, right, down and left)

Digital 4 = DB4

Digital 5 = DB5

Digital 6 = DB6

Digital 7 = DB7

Digital 8 = RS (Data or Signal Display Selection)

Digital 9 = Enable

Digital 10 = Backlit Control

- Shield sd card para-Arduino®

Este Shield es compatible con las placas basadas en Arduino®, su conexión y uso es sencillo, puesto que se conecta directamente sobre los pines de la placa, permitiendo que se sigan usando los pines del Arduino®, sus dimensiones están diseñadas para funcionar sobre la placa Arduino® UNO y permite almacenar información en una memoria SD directamente desde el Arduino®.



Su interfaz de conexión emplea el protocolo SPI, lo cual conlleva a ocupar los pines MOSI, MISO, SCK de la placa, también se conecta a la interfaz ICSP lo cual permite programar

a bajo nivel la placa sin necesidad de retirar el Shield.(Vistronica, 2022).

La interfaz de la tarjeta SD funciona con tarjetas formateadas FAT16 o FAT32.

Circuito de cambio de nivel 3.3 v evita daños a su tarjeta SD

El reloj en tiempo real (RTC) mantiene el tiempo funcionando incluso cuando el Arduino® está desenchufado.

La batería de respaldo dura años

El regulador integrado 3.3 v es a la vez un voltaje de referencia confiable y también ejecuta de forma confiable tarjetas SD que requieren una gran cantidad de energía para funcionar

Funciona con Arduino, UNO, Duemilanove, Diecimila, Leonardo o ADK / Mega R3 o superior. ADK / Mega R2 o inferior no son compatibles

Tamaño: 68x53x23 mm. (Vistronica, 2022).

- Sonda sensor de temperatura DS18B20

Esta es una versión impermeable del sensor de temperatura DS18B20. Útil para cuando se necesita para medir algo lejos, o en condiciones de humedad. ¡La lectura del sensor es hasta 125 ° C Debido a que la transmisión de la lectura de temperatura se hace en protocolo one-wire no hay pérdida de señal o inclusión de ruido, incluso en largas distancias! El DS18B20 ofrece lecturas de temperatura con una resolución de 9 a 12 bits (configurable) a través de una interfaz 1-Wire (Mecatrónica, “Sonda, sensor de temperatura DS18B20,” 2022).

Debido a que cada DS18B20 contiene un número de serie único de silicio, pueden existir múltiples DS18B20s en el mismo bus 1-Wire. Esto permite la colocación de sensores de temperatura en muchos lugares diferentes. Las aplicaciones donde esta característica es útil incluyen HVAC controles ambientales, temperaturas de detección dentro de los edificios, equipos o maquinaria, y

el seguimiento y control de procesos (Mecatrónica, “Sonda, sensor de temperatura DS18B20,” 2022).

Especificaciones Técnicas:



* Se puede utilizar con 3.0 V a 5.5 V de alimentación / datos

* $\pm 0,5$ ° C Precisión de -10 ° C a +85 ° C

* Rango de temperatura: -55 a 125 °C (-67 ° F a 257 ° F)

* Resolución seleccionable 9 a 12 bits

* Utiliza interfaz 1-Wire requiere solo un pin digital para la comunicación

Múltiples sensores pueden compartir el mismo pin del microprocesador

* Tiempo de respuesta inferior a 750 ms

* 3 cables de interfaz:

Cable rojo - VCC

Cable Negro - GND

Cable Azul - DATOS

Tubo de acero inoxidable de 6 mm de diámetro por 35 mm de largo

Diámetro del cable: 4 mm

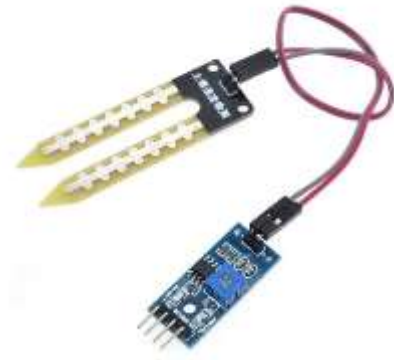
Longitud: del cable 90 cm

- Sensor de humedad del suelo yl-100

Este sensor de humedad puede leer la cantidad de humedad presente en el suelo que lo rodea. Es un sensor de baja tecnología, pero es ideal para el seguimiento de un jardín urbano (Mecatrónica, “sensor de humedad del suelo YL-100,” 2022).

Este sensor utiliza las dos sondas para pasar corriente a través del suelo, y luego lee la resistencia para obtener el nivel de humedad. Más agua hace que el suelo conduzca la electricidad con mayor

facilidad (menos resistencia), mientras que el suelo seco es un mal conductor de la electricidad (más resistencia) (Mecatrónica, “sensor de humedad del suelo YL-100,” 2022).



CARACTERÍSTICAS

Sensibilidad ajustable ajustando el potenciómetro digital (en azul).

Voltaje de operación: 3.3 V ~ 5 V

Modo de salida dual, salida digital y salida analógica más precisa.

Agujeros de montaje para una fácil instalación.

Dimensiones PCB: 30 mm * 16 mm

Dimensiones de sonda: 60 mm * 30 mm

Indicador de energía. Indicador, alimentación (rojo) e indicador de salida de conmutación digital (verde).

El módulo tiene un amplificador LM393.

DEFINICIÓN DE LOS PINES

VCC (5 V)

GND

Interfaz de salida digital (0 y 1)

Interfaz de salida analógica AO

- Sensor de ph analógico para Arduino® DFROBOT

El medidor de pH analógico está diseñado especialmente para Bords de Arduino®, cuenta con un práctico conector BNC para una conexión instantánea de la sonda y obtener mediciones de pH a ± 0.1 HP (25 ° C). Este sensor es una gran herramienta para sistemas bio robóticos, pruebas de calidad de agua o para la acuicultura. Para su funcionamiento simplemente se conecta el sensor de pH con el conector BND y a través de la interfaz PH2.0 a una entrada analógica de cualquier



Arduino® obtendrá el valor de pH fácilmente ajustándose su ganancia por medio del potenciómetro (Vistronica, “Sensor de pH analógico para Arduino®,” 2022).

Características

Marca: DFROBOT ITEM #SEN0161

Voltaje de alimentación:

5 VDC

Rango de medición:

0 - 14 PH

Temperatura de medición:

0 - 60 °C

Precisión:

± 0.1pH (25 °C)

Tiempo de respuesta:

≤ 1 min

Tamaño del módulo:

43 x 32 mm

Tipo de conector del sensor:

Conector BNC

- Caja Plastica Para Proyecto 15cmx9cmx5cm - 15x9x5

Dimensiones:

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH.
marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.



Largo: 15cm.

Ancho: 9cm.

Alto: 5cm.

NOTA: LAS MEDIDAS SON APROXIMADAS, PERMITA UN ERROR DE 2 A 5 MILÍMETROS EN LAS MEDIDAS

ESPECIFICACIONES:

Referencia de producto: CAJA PROYECTO 5.5X14X9.5

- Adaptador de voltaje 6v 1a conector jack 5.5x2.5 mm



Fuente de voltaje con salida de 6V a 1A y conector Jack 5.5x2.5 mm.

Esta fuente de voltaje es básicamente un convertidor de corriente alterna a corriente directa, su principio de funcionamiento es la conmutación lo cual permite que el producto final sea pequeño, liviano y eficiente.

- Arduino® UNO R3 Con CH340 con cable USB

Este es el nuevo Arduino® Uno R3 utiliza el microcontrolador ATmega328. En adición a todas las características de las tarjetas anteriores, el Arduino® Uno utiliza el ATmega16U2 para el manejo de USB en lugar del 8U2 (o del FTDI encontrado en generaciones previas). Esto permite ratios de transferencia más rápidos y más memoria. No se necesitan drivers para Linux o Mac (el archivo inf para Windows es necesario y está incluido en el IDE de Arduino®).(Vistronica, 2022).

La tarjeta Arduino® Uno R3 incluso añade pines SDA y SCL cercanos al AREF. Es más, hay dos nuevos pines cerca del pin RESET. Uno es el IOREF, que permite a los shields adaptarse al voltaje

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH.
marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.

brindado por la tarjeta. El otro pin no se encuentra conectado y está reservado para propósitos futuros. La tarjeta trabaja con todos los shields existentes y podrá adaptarse con los nuevos shields utilizando esos pines adicionales. (Vistronica, 2022).



El Arduino® es una plataforma computacional física open-source basada en una simple tarjeta de I/O y un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje Processing/Wiring. El Arduino® Uno R3 puede ser empleado para desarrollar objetos interactivos o puede ser conectado a software de tu computadora (por ejemplo, Flash, Processing, MaxMSP). El IDE open-source puede ser descargado gratuitamente (actualmente para Mac OS X, Windows y Linux).(Vistronica, 2022).

Características:

Microcontrolador ATmega328.

Voltaje de entrada 7-12V.

14 pines digitales de I/O (6 salidas PWM).

6 entradas análogas.

32 k de memoria Flash.

Reloj de 16 MHz de velocidad.

ANEXO 3. Calibración de Sensores

Sensor de Humedad.

Tabla 6. Calibración sensor de Humedad.

Calibración sensor de Humedad					
Agua (ml)	0	5	10	15	20

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH. marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.

Pmh	23,4631	28,2872	32,8476	38,2503	42,6200
Pms	20,0285	20,0200	19,9396	20,0540	23,1697
Pc	3,4371	3,4015	3,4162	3,4227	3,4162
pw (%)	20,70%	49,75%	78,12%	109,41%	98,47%
V	1,2400	4,4700	3,4400	3,0300	2,0200

Fuente: Autores.

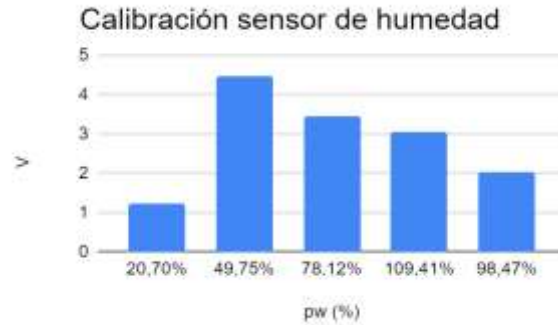


Figura 6: Calibración Sensor de Humedad.

Fuente: Autores.

Sensor de pH

Tabla 7. Calibración sensor de pH.

Solución buffer	V
4,01	1,14
7,01	1,82
10,01	2,62

Fuente: Autores.

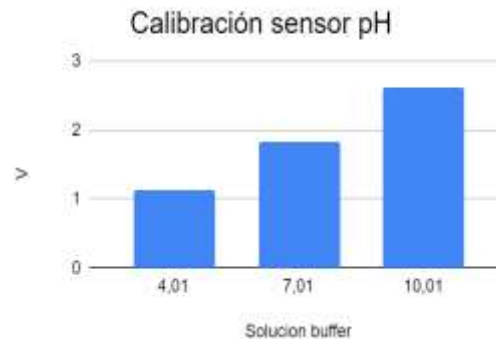


Figura 7: Calibración Sensor de pH.

Fuente: Autores.

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH. marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.

ANEXO 4. PROCESO DOCUMENTADO

<p>Procedimiento</p>	<p>Apertura de orificio y adaptación de llave para drenaje de lixiviados.</p>
<p>21/05/2022</p>	
<p>Adecuación de caneca para cumplir con las condiciones del prototipo, en términos de aireación y drenaje.</p>	<p>Revisión de sensores y sistema de monitoreo Arduino</p>
	
<p>Adecuación de aireador central</p>	<p>Recolección de material fresco</p>
	
<p>Adecuación de dispositivo que permita drenaje de lixiviados</p>	<p>Pesaje del material para tener proporciones exactas en pila piloto y en el biorreactor</p>
	

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH. marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.

<p>Biorreactor cargado de material lignocelulósico</p>

<p>Biorreactor cargado de material y monitoreando pH, temperatura y humedad.</p>

<p>10/06/2022</p>
<p>Se evidencia que la temperatura del biorreactor disminuye, a pesar de notarse la disminución del volumen ingresado inicialmente.</p> <p>Adicionalmente, el sensor de pH deja de funcionar, ya que este requiere una solución acuosa para funcionar correctamente, sin embargo, no se está recolectando lixiviado.</p> <p>Por lo tanto, el sensor no registra datos, se toma la decisión de visitar el prototipo de forma semanal para medir este parámetro</p>

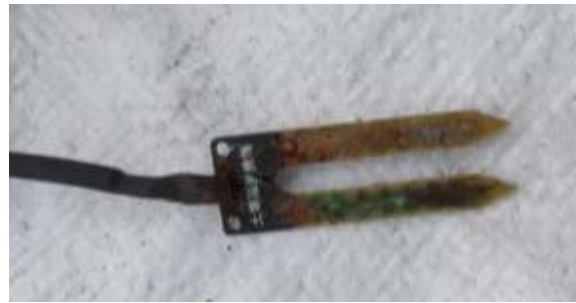
<p>por medio de un pH metro y así mismo hacer seguimiento de la pila piloto.</p>
<p>18/06/2022</p>
<p>Adaptación del biorreactor para aumentar de nuevo la temperatura y de este modo favorecer la biodegradación del material, se agrega el material en una bolsa plástica</p>

<p>Adaptación del biorreactor para aumentar de nuevo la temperatura, por medio de aislante térmico</p>

<p>25/06/2022</p>
<p>Se encuentran fallas en el sensor de humedad, ya que este mismo se corroe muy fácilmente, por lo tanto, se empieza a medir a través del método de la prueba de puño.</p>

Prototipo de biorreactor con monitoreo automatizado Arduino ® para medición de temperatura, humedad y pH. marzo 2022 - mayo 2023, Bogotá, Colombia.

Se mide pH y temperatura pila piloto y biorreactor.



02/06/2022

Se realiza seguimiento, medición de pH y temperatura al biorreactor y la pila piloto, continúan las fallas en el sensor de humedad.



26/08/2022

Se realiza aireación del material y se aplica fermento a base de levaduras y melaza, además de hidratar el material



Se calibra y se inserta nuevo sensor de Humedad más estable



05/09/2022

Se realiza la segunda caracterización del material en laboratorio

10/09/2022

Se encuentra el sensor de pH descalibrado y se procede a limpiarlo, quedando pendiente la calibración.



16/09/2022

Se realiza calibración del pH metro, quedando en óptimas condiciones y protegido de factores ambientales.



A partir de este punto el proceso se estabiliza y se genera la descomposición de acuerdo con las fases ideales del compostaje.

Adicionalmente, en el mes de noviembre se saca el material del biorreactor con el fin de dejarlo secar para triturar y obtener el producto final.