

Low-cost data logger for biofertilizer valorization as a strategy for mitigating climate variability

Ilber A. Ruge R., M.Sc.¹, Gloria L. Camargo M. PhD.²

¹ Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Escuela de Ingeniería Electrónica, grupo de investigación I2E, Tunja, Colombia, ilber_ruge@uptc.edu.co.

² Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Escuela de Ingeniería Ambiental, grupo de investigación GIGA, Tunja, Colombia, gloria.camargo@uptc.edu.co.

Abstract -- Within the composting process, temperature, humidity and pH play a fundamental role, as they influence the growth and development of microorganisms that carry out the process of decomposition of organic matter. The valorization of waste obtaining a biofertilizer (improving the chemical, biological and microbiological characteristics of the final product) is carried out as a strategy for the mitigation of climate variability, carried out within the framework of the research project funded by MinCiencias call 794-2017 with registration code: 61982 R+D Projects for the Biologically Based Technological Development of the Department of Boyacá Colombia. In this article, an electronic device for the automatic recording of temperature, humidity and pH in real time is described, as an instrument to support the process of sampling, monitoring, testing and characterization of co-composting, which leads to the obtaining of a biofertilizer with characteristics of harmlessness for the environment and public health. The device is designed to be low cost, its development is done with an Arduino Micro® Open Source card, a DS18B20 temperature sensor, an HD-38 soil moisture sensor, a pH-4502C sensor module, a MicroSD module, a DS3231 digital calendar, an LM2596 DC Step Down voltage regulator, a 7.5Vdc 2200mAH Li-Po battery, and its manufacturing cost is less than US\$100.

Keywords—Arduino, temperature sensor, humidity sensor, pH sensor, co-composting.

Registrador de datos (datalogger) de bajo costo para valorización de bioabono como estrategia para la mitigación de la variabilidad climática

Low-cost data logger for biofertilizer valorization as a strategy for mitigating climate variability

Ilber A. Ruge R., M.Sc.¹, Gloria L. Camargo M. PhD.²

¹ Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Escuela de Ingeniería Electrónica, grupo de investigación I2E, Tunja, Colombia, ilber.ruge@uptc.edu.co.

² Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Escuela de Ingeniería Ambiental, grupo de investigación GIGA, Tunja, Colombia, gloria.camargo@uptc.edu.co.

Resumen - Dentro del proceso de compostaje la temperatura, la humedad y el pH cumplen un rol fundamental, ya que influyen en el crecimiento y desarrollo de los microorganismos que realizan el proceso de descomposición de la materia orgánica. La valorización de residuos obteniendo un bioabono (mejorar las características químicas, biológicas y microbiológicas del producto final) es realizado como estrategia para la mitigación de la variabilidad climática, realizado en el marco del proyecto de investigación financiado por MinCiencias convocatoria 794-2017 con código de registro: 61982 Proyectos de I+D para el desarrollo tecnológico de base biológica del Departamento de Boyacá Colombia. En este artículo, se describe un dispositivo electrónico para el registro automático de temperatura, humedad y pH en tiempo real, como instrumento de apoyo al proceso de muestreo, seguimiento, pruebas y caracterización del co-compostaje, que conlleve a la obtención de un bioabono con características de inocuidad para el medio ambiente y la salud pública. El dispositivo se diseña para ser de bajo costo, su desarrollo se hace con una tarjeta Open Source Arduino Micro®, un sensor de temperatura DS18B20, un sensor humedad de suelo HD-38, un módulo sensor pH-4502C, un módulo MicroSD, un calendario digital DS3231, un regulador de voltaje DC Step Down LM2596, una batería Li-Po de 7.5Vdc 2200mAh, y su costo de fabricación es inferior a los US\$100.

Abstract -- Within the composting process, temperature, humidity and pH play a fundamental role, as they influence the growth and development of microorganisms that carry out the process of decomposition of organic matter. The valorization of waste obtaining a biofertilizer (improving the chemical, biological and microbiological characteristics of the final product) is carried out as a strategy for the mitigation of climate variability, carried out within the framework of the research project funded by MinCiencias call 794-2017 with registration code: 61982 R+D Projects for the Biologically Based Technological Development of the Department of Boyacá Colombia. In this article, an electronic device for the automatic recording of temperature, humidity and pH in real time is described, as an instrument to support the process of sampling, monitoring, testing and characterization of

co-composting, which leads to the obtaining of a biofertilizer with characteristics of harmlessness for the environment and public health. The device is designed to be low cost, its development is done with an Arduino Micro® Open Source card, a DS18B20 temperature sensor, an HD-38 soil moisture sensor, a pH-4502C sensor module, a MicroSD module, a DS3231 digital calendar, an LM2596 DC Step Down voltage regulator, a 7.5Vdc 2200mAh Li-Po battery, and its manufacturing cost is less than US\$100.

Palabras clave—Arduino, sensor de temperatura, sensor de humedad, sensor de pH, co-compostaje .

Keywords—Arduino, temperature sensor, humidity sensor, pH sensor, co-composting.

I. INTRODUCCIÓN

MinCiencias es el organismo para la gestión de la administración pública, rector del sector y del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SNCTI), encargado de formular, orientar, dirigir, coordinar, ejecutar, implementar y controlar la política del Estado Colombiano en esta materia, teniendo concordancia con los planes y programas de desarrollo, de acuerdo a su Ley de creación [1]. En el año 2017, MinCiencias hace la apertura de la convocatoria 794 para financiación de proyectos de I+D para el desarrollo tecnológico de base biológica que contribuyan a los retos del departamento de Boyacá, cuyo objeto principal es “Contribuir a la solución de los retos del Departamento de Boyacá en materia de agua y diversidad, cadenas agroindustriales y energías alternativas a través de la CTel”. En el marco de esta convocatoria se presentó el Proyecto titulado “Estrategia para la mitigación de la variabilidad climática en el departamento de Boyacá valorizando un bioabono de residuos sólidos orgánicos y lodos de plantas de

tratamientos de aguas residuales municipales”, siendo elegible para su ejecución según Resolución 0433 de 2018 Código de la propuesta ID-61982. Esta investigación busca la mitigación de la variabilidad climática en dos zonas del Departamento de Boyacá, mediante la obtención de un bioabono producido por el co-compostaje de residuos sólidos orgánicos RSO y lodos provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de municipios de Boyacá; este proceso se realiza, con el fin de mejorar las características químicas, biológicas y microbiológicas del producto final con miras a su aplicación en suelos degradados del departamento.

El proyecto inicio con una prueba en campo de co-compostaje de residuos sólidos orgánicos y lodos de PTAR, con el fin de determinar la mejor proporción de estos dos materiales mediante un diseño experimental que permita caracterizar las dos materias primas y las posibles mezclas. Por su alto impacto ambiental positivo, este proyecto plantea aplicar el bioabono para la restauración de suelos degradados en los predios denominados El Tablón y Santa Bárbara, Vereda San Antonio del Municipio de Duitama, estableciendo su efectividad en la disminución de acidez del suelo y en la siembra, y desarrollo de especies nativas. Para la obtención del bioabono son de principal interés tanto la calidad de las materias primas como la gestión del proceso. Por un lado, la presencia de contaminantes inorgánicos puede limitar el uso del producto respecto a la normativa. Por otro lado, aun cuando el material esté libre de contaminantes, si no se definen adecuadamente las condiciones iniciales (mezcla de residuos, lodos y agua) que aseguren la actividad microbiana y no se controla el proceso a través de diferentes parámetros, la calidad final probablemente no será la misma para alcanzar los estándares de estabilidad e higienización para su uso seguro [2].

Existen diferentes sistemas que permiten obtener el compost adecuado. Generalmente, se basan en el seguimiento de algunos parámetros básicos, como la temperatura, la humedad y el pH, para asegurar la calidad del producto final y la eficiencia del proceso [3]. Este artículo describe el desarrollo de un dispositivo electrónico tipo datalogger basado en microcontrolador para el monitoreo y registro automático de temperatura, humedad y pH en tiempo real, como instrumento de apoyo al proceso de muestreo, seguimiento, pruebas y caracterización del co-compostaje, que conllevó a la obtención de un bioabono con características de inocuidad para el medio ambiente.

II. COMPOSTAJE

El compostaje es un proceso biológico que ocurre en condiciones aeróbicas (presencia de oxígeno). Con la adecuada humedad y temperatura, se asegura una transformación higiénica de los restos orgánicos en un material homogéneo y asimilable por las plantas. Es posible interpretar

el compostaje como el sumatorio de procesos metabólicos complejos realizados por parte de diferentes microorganismos, que en presencia de oxígeno aprovechan el nitrógeno (N) y el carbono (C) presentes para producir su propia biomasa. Al descomponer el C, el N y toda la materia orgánica inicial, los microorganismos desprenden calor medible a través de las variaciones de temperatura a lo largo del tiempo. Según la temperatura generada durante el proceso, se reconocen tres etapas principales en un compostaje, además de una etapa de maduración de duración variable [4]. Las diferentes fases del compostaje se dividen según la temperatura, en:

A. Fase Mesofílica

El material de partida comienza el proceso de compostaje a temperatura ambiente y en pocos días (e incluso en horas), la temperatura aumenta hasta los 45°C. Este aumento de temperatura es debido a actividad microbiana, ya que en esta fase los microorganismos utilizan las fuentes sencillas de C y N generando calor. La descomposición de compuestos solubles, como azúcares, produce ácidos orgánicos y, por tanto, el pH puede bajar (hasta cerca de 4.0 o 4.5).

B. Fase termófila

Cuando el material alcanza temperaturas mayores que los 45°C, los microorganismos que se desarrollan a temperaturas medias (microorganismos mesófilos) son reemplazados por aquellos que crecen a mayores temperaturas, en su mayoría bacterias (bacterias termófilas), que actúan facilitando la degradación de fuentes más complejas de C, como la celulosa y la lignina. Estos microorganismos actúan transformando el nitrógeno en amoníaco por lo que el pH del medio sube. En especial, a partir de los 60°C aparecen las bacterias que producen esporas y actinobacterias, que son las encargadas de descomponer las ceras, hemicelulosas y otros compuestos de C complejos.

C. Fase de enfriamiento

Agotadas las fuentes de carbono y, en especial el nitrógeno en el material en compostaje, la temperatura desciende nuevamente hasta los 40-45°C. Al bajar de 40 °C, los organismos mesófilos reinician su actividad y el pH del medio desciende levemente, aunque en general el pH se mantiene ligeramente alcalino.

D. 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.

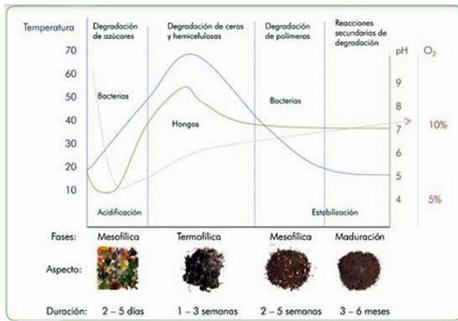


Fig. 1 Temperatura, oxígeno y pH en el proceso de compostaje. Fuente: [4].

Por otro lado, lo ideal es que el contenido de humedad esté en torno al 60% al inicio del proceso, cuando se mezclan los diferentes residuos orgánicos. Si el contenido de humedad excede el 60%, hay una pérdida de porosidad y por tanto el procedimiento se vuelve anaeróbico. Se iniciará la fermentación y el material emitirá olores, así como metano, como resultado de la descomposición anaeróbica de los desechos biodegradables. Si el contenido de humedad disminuye por debajo del 50%, la velocidad de descomposición disminuye porque los nutrientes deben estar en solución para ser utilizados por los microorganismos. Mantener el nivel correcto de humedad durante la fase termófila del compostaje puede resultar difícil, especialmente en un sistema de hileras al aire libre, debido a las condiciones climáticas secas o húmedas [2]. El seguimiento y control completo del proceso de compostaje implican la medición de varias cantidades, a saber, temperatura, humedad, oxígeno, pH, relación carbono-nitrógeno e incluso compuestos orgánicos volátiles. Así, el pH, la temperatura y la humedad son los indicadores más importantes de cómo evoluciona el proceso de compostaje. Deben ser objeto de un seguimiento correcto si se pretende mejorar la calidad del producto compost resultante.

III. MONITOREO DURANTE EL COMPOSTAJE

Ya 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. Estos factores incluyen el oxígeno o aireación, la humedad de sustrato, temperatura, pH y la relación C:N. Externamente, el proceso de compostaje dependerá en gran medida de las condiciones ambientales, el método utilizado, las materias primas empleadas, y otros elementos, por lo que algunos parámetros pueden variar. No obstante, éstos deben estar bajo vigilancia constante para que siempre estén siempre dentro de un rango óptimo [4].

A. Humedad

La humedad es un parámetro estrechamente vinculado a los microorganismos, ya que, como todos los seres vivos, usan el agua como medio de transporte de los nutrientes y

elementos energéticos a través de la membrana celular. La humedad óptima para el compost se sitúa alrededor del 55%, aunque varía dependiendo del estado físico y tamaño de las partículas, así como del sistema empleado para realizar el compostaje. Si la humedad baja por debajo de 45%, disminuye la actividad microbiana, sin dar tiempo a que se completen todas las fases de degradación, causando que el producto obtenido sea biológicamente inestable. Si la humedad es demasiado alta (>60%) el agua saturará los poros e interferirá la oxigenación del material.

B. Temperatura

La temperatura tiene un amplio rango de variación en función de la fase del proceso (Fig. 1). El compostaje inicia a temperatura ambiente y puede subir hasta los 65°C sin necesidad de ninguna actividad antrópica (calentamiento externo), para llegar nuevamente durante la fase de maduración a una temperatura ambiente. Es deseable que la temperatura no decaiga demasiado rápido, ya que a mayor temperatura y tiempo, mayor es la velocidad de descomposición y mayor higienización.

C. pH

El pH del compostaje depende de los materiales de origen y varía en cada fase del proceso (desde 4.5 a 8.5). En los primeros estadios del proceso, el pH se acidifica por la formación de ácidos orgánicos. En la fase termófila, debido a la conversión del amonio en amoníaco, el pH sube y se alcaliniza el medio, para finalmente estabilizarse en valores cercanos al neutro. El pH define la supervivencia de los microorganismos y cada grupo tiene pH óptimos de crecimiento y multiplicación. La mayor actividad bacteriana se produce a pH 6,0- 7,5, mientras que la mayor actividad fúngica se produce a pH 5,5-8,0. El rango ideal es de 5,8 a 7,2.

D. Métodos convencionales de medición

La recopilación manual de datos (medición de la temperatura, humedad y pH en las pilas) requiere mucho tiempo y puede exponer a las personas que recopilan los datos a patógenos dañinos. El contenido de humedad de una pila de compostaje generalmente se mide mediante el método de secado en horno, que es un método gravimétrico. Consiste en el secado a temperatura constante de una muestra de material y el cálculo de la relación de la masa evaporada (agua) con respecto a la masa inicial de la muestra. Esta medición "fuera de línea" es costosa debido a la gran cantidad de mano de obra necesaria para tomar la muestra y el posterior y prolongado procedimiento del método de secado en horno. Para la determinación del valor de pH existen numerosos métodos como los potenciométricos y colorimétricos. El primer método se emplea en laboratorio y el segundo en el campo. Si bien la medición por el método potenciométrico es simple, aspectos como los reactivos, soluciones de referencia y corrosión de los electrodos pueden alterar la medición [5]. De igual manera que

para el caso de medición de humedad, el pH requiere gran cantidad de mano de obra para la toma de muestras en campo.

IV. MATERIALES Y MÉTODO

El montaje piloto y seguimiento del proceso de co-compostaje se realizó en las instalaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia sede central y en un sitio dentro de los predios el tablón y Santa Barbará, de la vereda San Antonio del municipio de Duitama. Las unidades experimentales para la conformación del co-compostaje fueron las siguientes:

TABLA I
UNIDADES EXPERIMENTALES DEL BIOABONO

No.	% Biosolidos	% RSO
1	100	0
2	67	33
3	50	50
4	33	67
5	0	100

El tiempo de duración del proceso fue de 60 días y se requería realizar un seguimiento permanente a la temperatura, al pH y a la relación de humedad. Con el fin de establecer un mejor seguimiento al proceso de co-compostaje, se desarrolló un sistema electrónico para el registro automático de las magnitudes de las variables de temperatura, humedad y pH en tiempo real, como instrumento de apoyo a los investigadores, considerando el número de muestras y el tiempo de duración del experimento. Estos datos se emplearon para el análisis de la eficiencia de producción del bioabono obtenido.

A. Descripción del sistema de monitoreo desarrollado

El hardware del sistema de monitoreo del co-compost fue hecho en cinco unidades: Unidad de control, unidad de tiempo calendario, unidad de almacenamiento, unidad de medida, unidad de fuente de alimentación y unidad de comunicación con interface gráfica de usuario (GUI). La unidad de control es realizada con una tarjeta de desarrollo Open Source Arduino Micro® basada en un microcontrolador Atmega32u4 de 8 bits de la empresa Microchip Technology [6] configurado a 9600 baudios. La unidad de medición de temperatura está compuesta por un sensor DS18B20 [7] que mide temperaturas de hasta 125°C, posee envoltorio sellado que lo protege de la intemperie y corrosión, por ser un sensor digital la señal medida no se degrada por la distancia del cableado, funciona con protocolo One-Wire y tiene una precisión de +/-0.5°C con una resolución de 12 bits. Para la medición de humedad se usa un módulo sensor humedad de suelo resistente a corrosión HD-38, dado que las puntas del sensor son tratadas para resistir la oxidación y alargar su vida útil. El higrómetro consiste en una sonda con dos terminales metálicas separadas adecuadamente y un circuito electrónico que realiza un tratamiento de datos entregando un voltaje

proporcional a la humedad. El voltaje de alimentación es de 3.3Vdc hasta 12Vdc, y su voltaje de salida es adecuado para ser entregado a un puerto analógico de un microcontrolador. Y para la medición de pH se usa un módulo sensor de pH análogo 0 -14 con sonda BNC [8][9]. Este módulo de medición integra un circuito electrónico para la adquisición de datos y ofrece un voltaje analógico proporcional a la medición: la tarjeta de adquisición tiene un potenciómetro que permite la calibración de la sonda o electrodo. El rango de medición del electrodo es de 0-14, error de alcalinidad de 0.2 pH, resistencia interna ≤ 250 MΩ y tiempo de respuesta ≤ 1min.

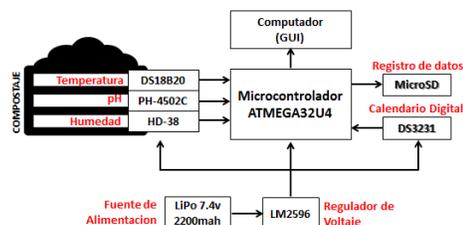


Fig. 2. Diagrama de bloques del sistema electrónico para monitoreo de Temperatura, Humedad y pH en el proceso de compostaje.

La parte del hardware responsable del tiempo y el almacenamiento de los datos está compuesto por un calendario de tiempo real RTC (Real Time Clock) DS3231 [10] y una tarjeta integrada MicroSD con 4GB. El periodo de muestreo para el registro de los datos fue de 3 horas para un total de 8 muestras/día, y el registro de los datos en la tarjeta MicroSD se realiza en archivo de texto estructurado con: Fecha:Hora:Temperatura:Humedad:pH. EL archivo de texto es compatible para ser leído en Microsoft Excel.

La unidad de alimentación se conforma con una batería recargable de Polímero de Litio (Li-Po) de 7.3V a 2200MAH junto con un reductor de voltaje DC Step Down LM2596 ajustado a 5Vdc. El algoritmo de control en la tarjeta Open Source Arduino Micro® considera el colocar el dispositivo de medición en modo de bajo consumo para aumentar la duración de la batería y garantizar el funcionamiento del hardware de monitoreo del compost durante el periodo de duración del experimento. El consumo de energía promedio del dispositivo electrónico de medición [11] se estableció de la siguiente manera:

$$\overline{I_{total}} = \overline{I_{reposo}} + \overline{I_{registro}} \quad (1)$$

donde, $\overline{I_{reposo}}$ es la corriente promedio en modo de bajo consumo (0.5mA), y $\overline{I_{registro}}$ es la corriente promedio al momento de hacer la lectura y registro de los datos en la unidad de almacenamiento. $\overline{I_{registro}}$ esta dado por:

$$\overline{I_{registro}} = \frac{I_{consumo} * T_{registro}}{T_{muestreo}} \quad (2)$$

donde, $I_{consumo}$ es la corriente medida al momento que el datalogger mide y registra los datos en la unidad de almacenamiento ($18.6mA$), $T_{registro}$ es el tiempo establecido para medir y registrar ($1s$), y $T_{muestreo}$ es 3 horas (para un total de 8 muestras/día). La corriente promedio durante el tiempo de registro es:

$$\overline{I}_{registro} = \frac{18.6mA * 1s}{10800s} = 1.72\mu A \quad (3)$$

Evaluando (1), la corriente total promedio de consumo es:

$$\overline{I}_{total} = 0.5mA + 1.72\mu A = 0.50172mA \quad (4)$$

El tiempo de durabilidad para una batería LiPo de 2200mAh es:

$$Dias_{duración} = \frac{\left(\frac{I_{batería}}{I_{total}}\right)}{Horas_{día}} = \frac{\left(\frac{2200mAh}{0.50172mA}\right)}{24} = 182.70 \text{ días} \quad (5)$$

El tiempo de duración del experimento para la conformación del compostaje fue de 60 días, por tanto el tiempo de funcionamiento autónomo del dispositivo datalogger es suficiente.

Los precios de los componentes del dispositivo electrónico (datalogger) son descritos en la Tabla II.

TABLA II
LISTA DE COMPONENTES USADOS PARA CONSTRUIR EN DATALOGGER.

No.	Componente	Precio
1	Arduino Micro®	US\$ 10.65
2	Sensor Temperatura DS18B20	US\$ 2.6
3	Sensor pH-4502C	US\$ 35.5
4	Sensor Humedad HD-38	US\$ 5.9
5	RTC DS3231	US\$ 4.5
7	Módulo MicroSD	US\$ 1.2
8	Memoria MicroSD 4GB	US\$ 4.7
9	Regular voltaje Step Down LM2596	US\$ 1.7
10	Batería recargable Li-Po 7.3V 2200mAh	US\$17.7
11	Caja de conexiones PVC IP65	US\$ 10.6
12	Placa de conexiones universal	US\$ 1.2
	Total	US\$ 95.1

Algunos dataloggers comerciales [12] pueden costar alrededor de \$345, ninguno de estos incluye el monitoreo de pH y en algunos casos se debe pagar costo adicional por derechos de licencia de software para la descarga y análisis de los datos.

B. Interface Gráfica de usuario (GUI)

La Interface Gráfica de Usuario (GUI) se desarrolló en Visual Studio 2019. La aplicación se realiza mediante Windows Forms App (.NET framework) usando lenguaje de programación C#. La comunicación con la tarjeta de desarrollo Arduino Micro® se realiza mediante el Toolbox SerialPort

(Component) configurado a 9600 baudios. La interface junto con el dispositivo electrónico de adquisición de datos, visualiza en tiempo real el comportamiento de las variables medidas (temperatura, humedad y pH), permite hacer seguimiento de las variables en rangos de tiempo deseados (diario y mensual) y almacenar en archivo Excel los datos supervisados.

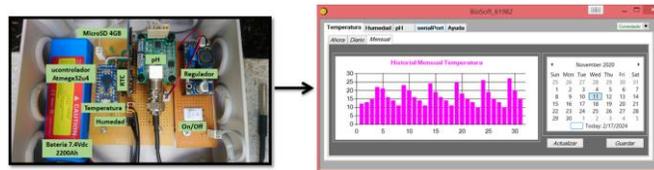


Fig. 3. Dispositivo datalogger para monitoreo de Temperatura, Humedad y pH e interface gráfica de usuario GUI.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Calibración del instrumento de medición

Para la calibración de los sensores se realizó un experimento en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia sede Tunja, y consistió en la medición simultánea de los sensores del dispositivo electrónico (datalogger) con un medidor de grado para investigación con calibración Check™ pH/ORP HI-5221 de Hanna Instruments, y el método gravimétrico por secado en horno para la humedad de suelo, sobre una pequeña muestra de suelo en un vaso de precipitado. El experimento se realizó con el acompañamiento del laboratorista, y se realizaron diez pruebas para temperatura y pH, y solamente dos para la humedad por lo extenso del tiempo y procedimiento del método. Las variaciones de los parámetros se realizaron cubriendo los rangos de temperatura, humedad y pH esperados en un proceso de compostaje típico.

La varianza (σ^2) asociada se expresó según BIPM/IEC/IFCC/ISO/IUPAC/IUPAP/OIML [13] como:

$$\sigma^2 = \frac{\sum((x - \bar{x})^2 * f)}{n} \quad (6)$$

donde, x es el promedio de los datos con frecuencia f , y n el número de datos. El coeficiente de varianza (C_v) para el sensor de temperatura fue de 5.2%, para el sensor de humedad 18.7% y para el sensor de pH 10.25%, dando como resultado incertidumbres de salida en relación con la medidas de los instrumentos de referencia de $\pm 1.0^\circ C$ para temperatura, $\pm 5\% HR$ para humedad y ± 0.4 para pH.

B. Registro de datos

El dispositivo electrónico de adquisición de datos (datalogger), visualiza en tiempo real el comportamiento de las variables medidas (temperatura, humedad y pH), permite hacer

seguimiento de las variables en rangos de tiempo deseados (diario y mensual) y almacenar en archivo Excel los datos supervisados. Un ejemplo del archivo de texto generado por la unidad de Almacenamiento del dispositivo datalogger se muestra en la Fig. 4, correspondiente al registro de datos del 10/10/2021 hasta 14/10/2021.

```

    BIO_UPTC - Notepad
    File Edit Format View Help
    2021/10/10 3:00 ****/ Temp_Compost: 12.50 Celsius ****/ Moisture_Compost: 45.00 %HR ****/ pH_Compost: 6.38
    2021/10/10 6:00 ****/ Temp_Compost: 13.30 Celsius ****/ Moisture_Compost: 42.00 %HR ****/ pH_Compost: 5.80
    2021/10/10 9:00 ****/ Temp_Compost: 14.60 Celsius ****/ Moisture_Compost: 48.00 %HR ****/ pH_Compost: 6.20
    2021/10/10 12:00 ****/ Temp_Compost: 16.40 Celsius ****/ Moisture_Compost: 46.00 %HR ****/ pH_Compost: 6.30
    2021/10/10 15:00 ****/ Temp_Compost: 18.70 Celsius ****/ Moisture_Compost: 45.00 %HR ****/ pH_Compost: 6.50
    2021/10/10 18:00 ****/ Temp_Compost: 15.30 Celsius ****/ Moisture_Compost: 43.00 %HR ****/ pH_Compost: 6.10
    2021/10/10 21:00 ****/ Temp_Compost: 14.60 Celsius ****/ Moisture_Compost: 49.00 %HR ****/ pH_Compost: 5.9
    2021/10/10 00:00 ****/ Temp_Compost: 11.50 Celsius ****/ Moisture_Compost: 47.00 %HR ****/ pH_Compost: 6.30

    2021/10/14 3:00 ****/ Temp_Compost: 10.50 Celsius ****/ Moisture_Compost: 35.00 %HR ****/ pH_Compost: 7.2
    2021/10/14 6:00 ****/ Temp_Compost: 10.30 Celsius ****/ Moisture_Compost: 38.00 %HR ****/ pH_Compost: 6.80
    2021/10/14 9:00 ****/ Temp_Compost: 12.60 Celsius ****/ Moisture_Compost: 39.00 %HR ****/ pH_Compost: 6.20
    2021/10/14 12:00 ****/ Temp_Compost: 15.60 Celsius ****/ Moisture_Compost: 41.00 %HR ****/ pH_Compost: 6.40
    2021/10/14 15:00 ****/ Temp_Compost: 15.20 Celsius ****/ Moisture_Compost: 40.00 %HR ****/ pH_Compost: 6.50
    2021/10/14 18:00 ****/ Temp_Compost: 14.40 Celsius ****/ Moisture_Compost: 41.00 %HR ****/ pH_Compost: 6.60
    2021/10/14 21:00 ****/ Temp_Compost: 11.60 Celsius ****/ Moisture_Compost: 43.00 %HR ****/ pH_Compost: 6.9
    2021/10/14 00:00 ****/ Temp_Compost: 11.00 Celsius ****/ Moisture_Compost: 39.00 %HR ****/ pH_Compost: 6.60
  
```

Fig. 4. Reporte de datos en archivo de texto almacenado en MicroSD

C. Resultados en campo

El montaje piloto del proyecto de investigación se hizo en cinco unidades experimentales (ver Tabla I), y el dispositivo datalogger se instaló en la unidad experimental No. 4 durante los 60 días que duro el experimento de monitoreo y valorización del bioabono. Por tanto, los datos registrados por el dispositivo electrónico desarrollado corresponden a las muestras T4 (color verde) de la Fig. 5.

D. Ventajas de uso

El número de visitas de los investigadores del proyecto de investigación al lugar de los experimentos con pilas de co-compostaje, podría reducirse de una vez al día (tomando solamente dos (2) datos por variable: una en la mañana y otra en la tarde), a una vez a la semana con la sustitución de las lecturas manuales por las lecturas automáticas mediante el dispositivo datalogger (tomado ocho (8) datos de cada variable durante el día). Si bien, para las unidades 1, 2, 3, y 5 se hizo el seguimiento diario de los investigadores (lecturas manuales), la unidad 4 no tuvo intervención (lectura automática). La intervención a esta unidad se hizo una vez a la semana para la verificación de la calibración del sensor de pH debido a la acidificación y/o corrosión de los electrodos. Estas visitas pueden reducirse aún más, si el dispositivo datalogger integra transmisión remota de datos inalámbricamente.

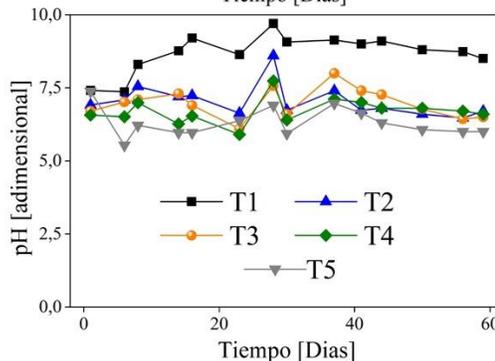
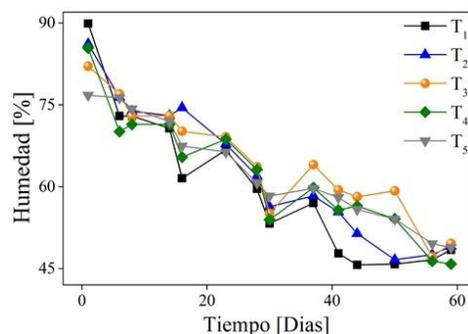
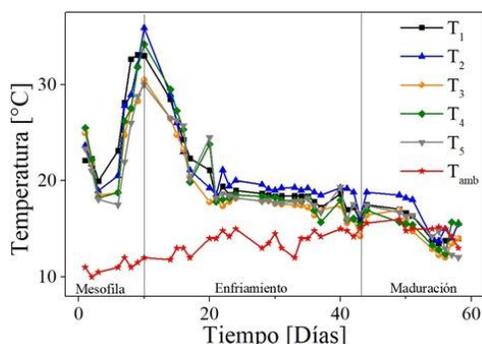


Fig. 5. Resultados de medición de temperatura, humedad y pH en pilas de co-compostaje.

E. Precio

Finalmente, los componentes usados se encontraron fácilmente en el mercado nacional, el precio (US\$95) puede considerarse bajo, en comparación con los modelos comerciales [12] que pueden costar más del triple, y ninguno de las referencias consultadas integra en su solución la medición de pH.

VI. CONCLUSIONES

El dispositivo electrónico de medición y registro desarrollado en este trabajo ofrece un marco adicional sobre como una plataforma con enfoque de código abierto (Arduino Micro®), da posibilidades de creación a tecnologías personalizadas de bajo costo. El mercado actual ofrece alternativas de sensores de bajo precio que permiten prever aplicaciones a medida donde el conocimiento de las variables de un proceso es vital para obtención de objetivos deseados. Los datos recopilados en el experimento de valorización de bioabono descrito en este trabajo, dio como resultado que la conformación de bioabono de la unidad experimental No. 3 (50% biosólidos y 50% RS0) era la mejor alternativa. Los resultados de la valorización fueron aplicados en el proceso de restauración de suelos degradados.

Las mediciones y registros realizados por el dispositivo electrónico de medición (datalogger) fueron satisfactorios y compatibles con las exigencias operativas del compostaje. El bajo precio de construcción (US\$95) hace de este tipo de

desarrollos una alternativa viable para escalar a mayor número de pilas de compostaje, ampliando así el número de registros de seguimiento, disminuyendo ampliamente el número de visitas de los investigadores al lugar del experimento, y eliminando el registro manual de los datos. La misma plataforma también se puede utilizar para recopilar más datos, dada la facilidad de adición de otros sensores ambientales para ampliar el conocimiento del proceso de descomposición de los residuos o procesos similares.

La autonomía del dispositivo electrónico o tiempo de funcionamiento sin intervención de operario en campo, fue satisfactorio (180 días), aunque con margen de mejora. El consumo de corriente en reposo es de $0.5mA$, y este valor puede bajar aún más si se desarrolla un módulo de medición de pH y una unidad de Control (Arduino Micro®) que elimine el diodo Led indicador de encendido, dado que este no es posible apagarlo cuando se establece el inicio del modo de bajo consumo (Sleep Mode). Una corriente de consumo con amplitud en microamperios (μA) ampliara significativamente la duración de la batería sin sacrificar el bajo costo de fabricación del dispositivo datalogger, ampliando la posibilidad de aplicación a pilas de mayor volumen (mayor tiempo de descomposición de los residuos) y la adición de una unidad de transmisión remota de datos.

REFERENCIAS

- [1] Sobre MinCencias. <https://www.colciencias.gov.co/ministerio/sobremincencias>.
- [2] O. Casas, M. Lopez, M. Quiles, B. Borgues y P. Silva, “Wireless sensor network for smart composting monitoring and control” *Measurement / Elsevier*, vol. 47, pp. 483-495, 2014.
- [3] M. Jordao, K. Paiva, H. Firmo, C. Inacio, O. Rottuno y T. Lima. “Low-cost automatic station for compost temperature monitoring” *Revista brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental*, vol. 21, No. 11, pp. 809-813, 2017.
- [4] P. Roman, M. Martínez y A. Pantoja, Manual de compostaje del Agricultor: Experiencias en América Latina, Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura, FAO Press, pp. 22-25.
- [5] Y. Valderrama. Diseño e implementación de un instrumento electrónico de medida de pH para terreno agrícola. Escuela de Ciencias básicas, Tecnología e Ingeniería. Ingeniería Electrónica, Ibagué Tolima, 2017.
- [6] ATmega32U4 Product Features. <https://www.microchip.com/en-us/product/ATMEGA32U4>.
- [7] DS18B20 Programmable resolution. 1-wire® Digital Thermometer. Dallas semiconductor. <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temp/DS18B20.pdf>
- [8] G. Cordova, E. Montiel, J. Ramírez, P. Robles y H. Pérez, “Diseño e implementación de un prototipo medidor de pH y humedad en el suelo de un invernadero” *Sinergia mecatrónica*, Capítulo 4, ISBN: 978-607-9394-17-2, pp. 35-46, 2019.
- [9] S. Vásquez, N. Batista, L. Santana, B. Guerrero, R. Morales, J. Sánchez, E. Matus y J. Molino. “Diseño y construcción de un prototipo de instrumento multiparámetro para el monitoreo continuo a distancia de variables físicas”, 8th International Engineering, Science and Technology Conference (IESTEC), Panamá, 2023.
- [10] DS3231 Extremely Accurate I2C-integrated RTC/TCXO/Crystal. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS3231.pdf>
- [11] I. Ruge, F. Jiménez y O. Hernández, “Prototipo de Sistema de vigilancia de Ganado usando red de supervisión inalámbrica para prevención de abigeato”, *Ingenio Magno*, vol. 7, No. 2, pp. 87-101, 2016.
- [12] Datalogger, registrador de datos de temperatura y humedad. OneLab. <https://www.onelab.com.co/datalogger-registrador-de-datos-de-temperatura-y-humedad-ezdo>.
- [13] BIPM/IEC/IFCC/ISO/IUPAC/IUPAP/OIML. Evaluación de datos de medición – guía para la expresión de la incertidumbre de medida. Primera edición. 2008.