

Potencialidad del CEADEN para desarrollar sistemas inalámbricos de monitoreo ambiental y su empleo para la conservación del patrimonio cultural

 Ana Ester Cabal Rodríguez¹,  Lorenzo Hernández Tabares¹,  Isabel Otero Abreu¹,
 Dania Rodríguez Nápoles¹,  Piet Van Espen²

¹ Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN). Calle 30 esq. 5ta Ave. Miramar, Playa, La Habana.

² Departamento de Física, Universidad de Amberes, Bélgica

acabal@ceaden.edu.cu

Resumen

El Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN) demostró la capacidad de asimilar las nuevas tecnologías de internet de las cosas desarrollando un sistema inalámbrico de monitoreo ambiental. El sistema está basado en una red inalámbrica de sensores, empleando plataformas electrónicas de hardware y software libres como Arduino y conectadas entre sí mediante la interfaz inalámbrica de comunicación LoRa. El sistema posibilitó la medición continua de parámetros ambientales cubriendo grandes áreas dentro del Museo Nacional de Bellas Artes. La larga experiencia del laboratorio de microbiología facilitó la creación de un procedimiento para el muestreo microbiano, realizado en paralelo con las mediciones ambientales. La combinación del monitoreo ambiental con el muestreo microbiológico mostraron que pueden ser herramientas que ayuden a los conservadores de arte a la preservación del patrimonio cultural.

Palabras clave: muestreo; sensores; objetos culturales; conservación; microanálisis, internet; microorganismos; calidad ambiental.

Potential of CEADEN to develop wireless environmental monitoring systems and their use for cultural heritage conservation

Abstract

Center for Technological Applications and Nuclear Development (CEADEN) demonstrated the ability to assimilate new Internet of Things technologies by developing a wireless environmental monitoring system. The system is based on a wireless network of sensors, using free hardware and software electronic platforms such as Arduino and LoRa wireless communication interface. It enabled the continuous measurement of environmental parameters covering large areas within the National Museum of Fine Arts. The long experience of the microbiology laboratory facilitated the creation of a procedure for microbial sampling, carried out in parallel with environmental measurements. The combination of environmental monitoring with microbiological sampling showed that they can be tools that help art conservators to preserve cultural heritage.

Key words: sampling; sensors; cultural objects; preservation; microanalysis; internet; microorganisms; environmental quality.

Introducción

Preservar el patrimonio cultural heredado de nuestros ancestros y pasarlo a las nuevas generaciones con el menor daño posible es una tarea primordial de los guardianes de ese patrimonio. Especialistas del Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear, (CEADEN), desde comienzos del siglo XXI han interactuado con colegas de instituciones encargadas de preservar el patrimonio cul-

tural en nuestro país. Existen ejemplos de esa colaboración que ha sido desde el uso de métodos nucleares para el estudio de cerámica arqueológica [1, 2] y de pinturas [3] del Gabinete de Arqueología de la Oficina del Historiador de la Ciudad de La Habana y del Consejo Nacional de Patrimonio Cultural, hasta la determinación de la carga microbiana de documentos de la Cinemateca de Cuba. En el marco de la colaboración con la Universidad de Amberes, Bélgica, colegas del CEADEN han participa-

do en el desarrollo de sistemas, empleando diversas técnicas de rayos X, para la investigación de pinturas [4-9].

De la experiencia adquirida trabajando en esta temática se constató que la conservación de las obras de arte está fuertemente influenciada por la calidad de las condiciones de su preservación. Los altos valores de humedad relativa y temperatura, propios de los países tropicales, unido a la contaminación ambiental en zonas urbanas y al inapropiado acondicionamiento de los locales destinados a exponer o guardar las colecciones ponen en peligro su durabilidad en el tiempo. Estos factores también son los que acentúan el nivel de contaminación microbiana de los ambientes cerrados, como los museos. Una herramienta necesaria para seleccionar y mantener las mejores condiciones de preservación es el monitoreo sistemático del ambiente en que se guardan las colecciones [10, 11], el análisis de sus parámetros físicos (temperatura, humedad relativa, presión, intensidad de la luz visible y ultravioleta), químicos (material particulado en el aire, concentración de gases contaminantes), así como microbiológicos. La medición continua y simultánea de un variado número de parámetros ambientales da una información de gran utilidad sobre los riesgos a los cuales se expone la colección, permitiendo detectar las tendencias o desviaciones de las condiciones ambientales establecidas y así identificar posibles daños incipientes y actuar antes de que estos sean irreversibles.

El uso de tecnologías en apoyo a la conservación del patrimonio cultural se ha incrementado, debido a que desde comienzos del siglo XXI se ha producido un progreso en la electrónica de hardware y software libres, las comunicaciones inalámbricas y la producción de sensores de pequeño y bajo costo. Para el monitoreo de las condiciones ambientales en museos y archivos ya existen en el mercado algunos sistemas, varios de los cuales solo miden humedad y temperatura [12-17]. En muchos casos la electrónica y la programación de esos sistemas no es de código abierto y por lo tanto no pueden ser modificadas o sólo serlo mediante pago, a lo que se agrega además la desventaja de que tienen un precio elevado. Esta electrónica de hardware y software libres puede ser una alternativa importante en el desarrollo de sistemas especializados para el cliente con un costo asequible. Existen algunos ejemplos de desarrollo de sistemas específicos de adquisición de datos para el uso en la conservación del patrimonio cultural [18-21]. Además se constató en la bibliografía que en nuestro país existen serios trabajos de estudios ambientales microbianos. [22-24].

Aprovechando la experiencia del CEADEN en el trabajo con sensores ambientales, en el desarrollo de sistemas automáticos y del grupo de microbiología se asumió el reto de desarrollar un sistema inalámbrico de monitoreo ambiental simultáneo y continuo de mediano costo, específico para las condiciones de nuestro país. Empleando plataformas electrónicas de hardware y software libres como Arduino, conectadas en red con la interfaz inalámbrica de comunicación LoRa, se desarrolló un sistema automatizado que sigue la tendencia actual

del Internet de las Cosas (IoT). Paralelamente, se realizó además un muestreo microbiológico, de manera que se acumulara suficiente información que pudiera relacionar los resultados de las mediciones del monitoreo de los parámetros físicos con los del microbiano.

Debido al interés mostrado por las autoridades del Museo Nacional de Bellas Artes la comprobación del prototipo a desarrollar se realizó en esa institución. Luego de revisar el estado del arte de sistemas de monitoreo ambiental en sitios de patrimonio cultural, así como de interactuar con especialistas del Museo Nacional de Bellas Artes, estudiando las características tanto técnicas como ambientales de los locales donde se encuentran las obras de arte, y definiendo los parámetros más importantes a medir para determinar la calidad del aire en el museo, se diseñó el esquema del sistema de monitoreo ambiental a desarrollar.

Diseño de sistema inalámbrico de monitoreo ambiental para su uso en museos y otros sitios patrimoniales

1. Sistema de monitoreo ambiental

El sistema seleccionado se conformó en base a la llamada red de sensores inalámbricos “WSN” por su nombre en inglés (*wireless sensor network*) (figura 1), red que en la actualidad se usa ampliamente en aplicaciones IoT [25-29], donde se pueden monitorear diferentes parámetros mediante los sensores y en dependencia del valor de los mismos tomar acciones.

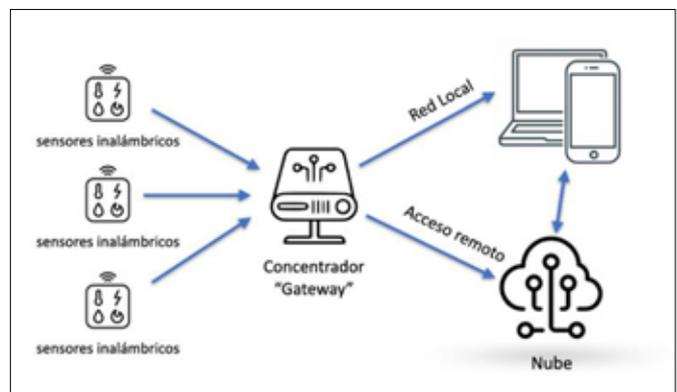


Figura 1. Esquema de una red de sensores inalámbricos usada en aplicaciones IoT.

La red está conformada por nodos de sensores inalámbricos, los cuales se comunican con un concentrador o “gateway”, que permite la transmisión de la información dentro de una red local o a través de acceso remoto, garantizando la accesibilidad de los datos de las mediciones en todo momento y de cualquier lugar.

Para el diseño del sistema de monitoreo ambiental se estudiaron los componentes más importantes de esta red, que son: los sensores, el hardware de conexión y el tipo de comunicación inalámbrica, los cuales serán explicados a continuación:

1.1. Comunicación inalámbrica

Se realizó un estudio sobre los diferentes tipos de comunicación inalámbrica tales como los que confor-

man las redes personales “PAN” (WiFi, Bluetooth), las redes de amplio alcance “WAN” (donde se incluyen las 4G, 5G) o las de bajo consumo y largo alcance “LPWAN” (Sigfox, LoRaWAN), comparando sus características tales como: alcance y transferencia de datos, consumo de energía y uso de espectro de radiofrecuencia de banda libre o con licencia mediante pago.

Del estudio se decidió escoger la comunicación LoRa (Long Range, que quiere decir de largo alcance), que es un tipo de modulación en radiofrecuencia patentado por Semtech y es la parte física del protocolo de red LoRaWAN, sus características son [29-30]:

- Bajo consumo (hasta 10 años con una batería según el fabricante Semtech).
- Largo alcance, de 10 a 20 km (rural), de 2 a 5 km (urbano).
- Baja transferencia de datos (hasta 255 bytes).
- Alta tolerancia a las interferencias.
- Alta sensibilidad para recibir datos (-168dB).
- Basado en la modulación de espectro expandido tipo “chirp”.
- Frecuencias de trabajo en el espectro sin licencia de la banda de radio ISM (Industrial, Científica y Médica): 915 MHz en Estados Unidos, 868 MHz en Europa, 433 MHz en Asia.
- Se pueden conectar hasta 1000 nodos o sensores con un concentrador LoRa.

Esta tecnología permite que los dispositivos conectados intercambien pequeñas cantidades de datos a baja velocidad con un largo alcance y bajo consumo de energía. Estos son requisitos importantes para la medición de parámetros en museos donde se deben cubrir grandes áreas y se necesitan dispositivos que estén alimentados con baterías.

1.2. Sensores

Debido a la amplia gama de sensores que existen en la actualidad, se escogieron los sensores que permiten medir los parámetros determinantes de la calidad del ambiente en el museo, los cuales fueron: temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, intensidad de rayos ultravioletas UVA y UVB e intensidad de la luz. También pueden adicionarse otros sensores, para estudios específicos o en determinados lugares, tales como de movimiento, de gases, conteo de partículas finas. Todos los sensores seleccionados se acoplan con el sistema por medio de interfaces de comunicación en serie I2C ó SPI.

1.3. Hardware de conexión

Se basó en placas de desarrollo de bajo costo con software libre, principalmente usando la plataforma de creación de electrónica de código abierto basada en hardware y software libres Arduino [31]. Existe una gran variedad de estas tarjetas con microcontroladores fabricadas por Arduino, lo cual permitió la creación de un sistema de estaciones satélites de medición, que se comunican de manera inalámbrica con una estación máster, la cual tiene como misión el control de las estaciones satélites en tareas como la transferencia y el almacenamiento de datos.

El sistema de monitoreo ambiental conformado (figura 2) es el siguiente:

- Estaciones satélites de medición compuestas por dos módulos de Arduino: MKR WAN 1310 y MKR ENV, alimentándose con baterías de Li (o Pb usando un regulador de voltaje de 3.3 V para su uso en las salas de exposición del museo), las características de cada módulo se muestran en la tabla 1.

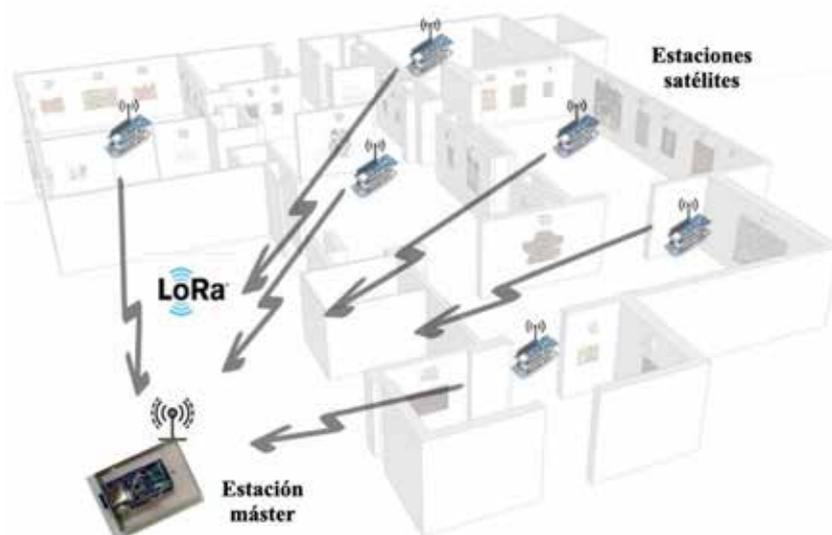


Figura 2. Sistema de monitoreo ambiental compuesto por 6 estaciones satélites de medición y una estación máster.

- Estación máster con la combinación de la tarjeta con microcontrolador ATmega2560 de Arduino MEGA y la tarjeta Adafruit RFM95W de radio LoRa, conectada a la red eléctrica, las características de cada módulo se muestran en la tabla 1.
- La comunicación inalámbrica entre las estaciones satélites y la estación máster seleccionada del tipo radio LoRa a frecuencia de 868 MHz.
- Las mediciones se guardan en tarjetas SD.
- El software de funcionamiento del sistema se desarrolló en el lenguaje C++ conjuntamente con ARDUINO IDE y permite la medición de los parámetros ambientales, el almacenamiento de los datos y la comunicación entre los dispositivos.

2. Sistema de monitoreo microbiano

El muestreo microbiológico se realizó en el mismo local y al mismo tiempo en que se realizaron las mediciones de monitoreo ambiental, de manera tal que al acumularse suficiente información pudieran relacionarse los parámetros de ambas mediciones. Por esta razón se consideró conveniente aplicar el método de placa expuesta, tal como se describe en la NC-26-211 [32], se colocaron las placas con medios de cultivo en lugares próximos y al mismo nivel que los sensores. Teniendo en cuenta que el método de muestreo es pasivo, se determinó colocar 4 placas por cada sensor, con al menos 2 medios de cultivo como mínimo. Las placas estuvieron abiertas durante 15-20 minutos, luego se cerraron, sellaron y se trasladaron al laboratorio, donde se pusieron a incubar durante 5 días. Posteriormente se contaron las colonias, se describió la morfología y se conservaron los microorganismos aislados para posterior descripción microscópica e identificación taxonómica, al menos hasta el nivel de género. Los conteos reportados corresponden a una hora de exposición al aire, extrapolando los resultados obtenidos a ese tiempo de referencia.

Las mediciones se realizaron principalmente cerca del mediodía, ya que autores consultados [22] muestran que la mayoría de los hongos detectados en el aire de La Habana muestran un patrón diurno, con el mayor pico previo al mediodía.

Comprobación del primer prototipo de sistema de monitoreo ambiental y microbiano en el Edificio de Arte Universal del Museo Nacional de Bellas Artes

Durante los años 2020 y 2021 se realizaron diversas mediciones en el Museo Nacional de Bellas Artes para comprobar el funcionamiento del sistema de monitoreo ambiental. La mayoría de ellas se hicieron sin la afluencia de público en el museo, debido a las regulaciones por la pandemia COVID 19. Primeramente se realizó la prueba del alcance de la comunicación por LoRa entre la estación máster y las estaciones satélites (conocido como la medición del “link budget”). La estación máster se colocó en un lugar específico de la planta baja y los satélites en todas las áreas de exposición y almacenamiento del Edificio de Arte Universal. Se comprobó buen alcance de la señal de comunicación en la mayoría de las áreas.

Posteriormente se realizaron muestreos ambientales continuos por un período de 15 días, midiendo en cada minuto los parámetros de temperatura, humedad, intensidad de la luz o iluminancia y cantidad de partículas finas. Las áreas del Edificio de Arte Universal analizadas fueron:

- Sala España; 3er piso, 2021
- Sala Francia; 4to piso, 2021
- Sala Antigüedad; 4to piso, 2020
- Sala Gran Bretaña e Italia; 5to piso, 2021
- Sala Flamenca; 5to piso, 2020
- Salas Latinoamérica y Estados Unidos; planta baja, 2020, 2021
- Sala exposición transitoria en planta baja; 2020, 2021

Tabla 1. Características técnicas de los componentes del sistema de monitoreo.

<p>Arduino MKR WAN 1310</p> <ul style="list-style-type: none"> • Microcontrolador de 32 bits • módulo de radio LoRa 868 MHz • 8 pines I/O digitales • 7 pines I analógicas (CAD 8/10/12 bit) • 1 pin O analógica (CDA 10 bit) • CPU memoria Flash 256 kB (interna) • QSPI memoria Flash 2 Mbyte (externa) • Voltaje trabajo 3.3 V • ~ 40 € 	<p>Arduino MKR ENV</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tiene incluido los sensores <ol style="list-style-type: none"> 1. LPS22HB: Presión atmosférica 2. HTS221: Temperatura y humedad 3. VEML6075: Intensidad de luz ultravioleta UVA y UVB, índice UV 4. TEMT600: Intensidad de luz • Voltaje trabajo 3.3 V • Tarjeta SD • Comunicación: I2C/ Analógica • ~ 35 €
<p>Arduino MEGA ATmega2560</p> <ul style="list-style-type: none"> • Microcontrolador de 8 bits, reloj 15 MHz • 54 pines I/O digitales, • 16 pines I analógicas • Memoria Flash 256 kB, EEPROM 4 kB • Voltaje trabajo 5 V • ~ 45 € 	<p>Adafruit RFM95W</p> <ul style="list-style-type: none"> • Transmisor-receptor de radio LoRa • 868 o 915 MHz • Potencia de salida 20 dBm • Rango de 2 km • Voltaje trabajo 3.3 V • ~ 25 €

- Almacén de Pinturas VI; sótano, 2020, 2021
- Almacenes de Pinturas VII e Instalaciones; sótano, 2021

Un ejemplo de estas mediciones son los gráficos mostrados en la figura 3, que corresponden al monitoreo en el mes de febrero del 2020 en un área de exposición y otra de almacenamiento. Una estación satélite se colocó sobre una vitrina que contiene cerámicas etruscas, la cual está situada cerca de una ventana, en el ala sureste del cuarto piso del museo. El gráfico con las mediciones de iluminancia muestra los máximos valores cerca de las 9 de la mañana. La temperatura promedio fue de $24,2 \pm 1,1^\circ\text{C}$. Se observan fluctuaciones tanto de la temperatura como de la humedad relativa, cuyo valor promedio fue de $65,5 \pm 3,2\%$. La segunda estación satélite se colocó en la sala VI de almacenamiento de pinturas, ubicada en el sótano del edificio, en la zona central. La temperatura promedio fue de $22,7 \pm 0,3^\circ\text{C}$, mientras que la humedad relativa fue de $62,2 \pm 2,3\%$. En las áreas de almacenamiento los parámetros ambientales se mantuvieron más estables, aunque en ocasiones por encima de los valores recomendados. En varias mediciones se detectó que no se cumplen los parámetros de temperatura y humedad relativa que debería entregar el sistema de clima.

La información aportada por el monitoreo muestra que existen condiciones de riesgo para la preservación de los objetos expuestos. Es necesario realizar un estudio durante un tiempo prolongado (algunos meses)

para entender mejor estos riesgos. De todos modos los resultados de las mediciones preliminares mostraron que se pueden mejorar las condiciones de los locales de exposición y almacenamiento, eliminando la influencia de la luz solar, así como lograr el valor requerido y una mayor estabilización de parámetros ambientales como humedad relativa y temperatura con un adecuado funcionamiento del sistema de refrigeración del museo. En el futuro se deben correlacionar los parámetros ambientales medidos en el interior del museo con las condiciones meteorológicas presentes durante el período de medición.

Paralelamente al estudio ambiental se realizaron los muestreos microbiológicos para detectar la presencia de hongos y bacterias. El medio de cultivo Agar Dextrosa Sabouraud es el que mostró más eficiencia para el recobrado de los hongos ambientales en el microambiente estudiado (figura 4). Por otro lado el género *Aspergillus* fue el más frecuentemente aislado, lo cual corresponde por lo reportado por otros autores [22]. También se constató incremento de la carga fúngica ambiental en el período de afluencia de público. Se determinó que se necesitan más datos, o sea realizar más muestreo microbiano durante el monitoreo ambiental, para poder identificar una correlación entre los resultados de las mediciones de los parámetros físicos con los microbianos.

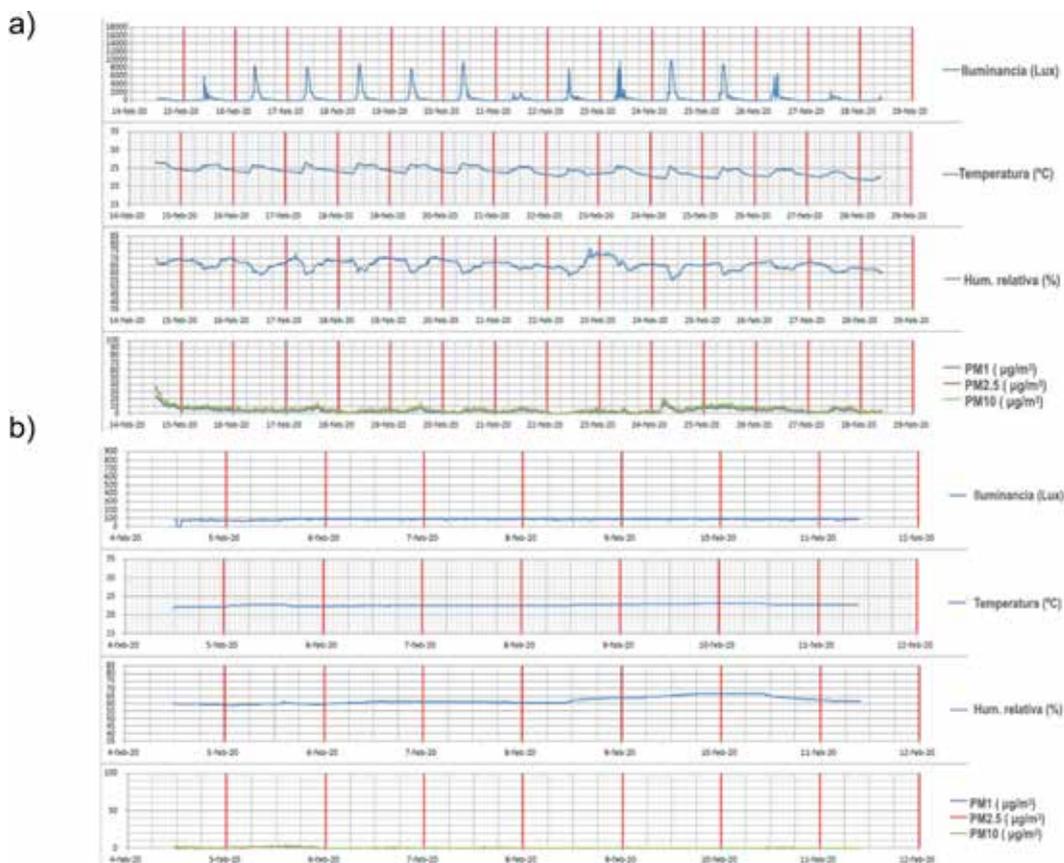


Figura 3. Monitoreo de parámetros ambientales realizado en el mes de febrero del 2020 en a) un área de exposición y b) otra de almacenamiento.



Figura 4. Los hongos filamentosos ha sido el grupo microbiano más frecuente en el microambiente estudiado.

Conclusiones

Se diseñó un sistema inalámbrico de monitoreo ambiental, asimilando la tecnología de internet de las cosas. Este sistema se comprobó en el Museo Nacional de Bellas Artes con resultados alentadores. Se constató que todavía se necesitan perfeccionar algunos aspectos importantes para tener un sistema de monitoreo ambiental profesional que ayude a preservar las obras del patrimonio cultural. Entre estos aspectos se encuentra aumentar el tiempo de duración de autosuficiencia de las estaciones satélites, correlacionar los parámetros ambientales dentro del museo con las condiciones meteorológicas en el exterior, realizar una mayor cantidad de mediciones en todas las áreas del museo para tener mayor información y lograr establecer una correlación entre los parámetros físicos y los microbiológicos, así como evolucionar a la comunicación de una red LoRaWAN clásica.

El laboratorio de microbiología del CEADEN con su larga experiencia en la determinación de la carga microbiana de diferentes productos y ambientes, específicamente en el caso del muestreo microbiano en el Museo Nacional de Bellas Artes, contribuyó a demostrar que la microbiología puede ser una herramienta que aporte las evidencias necesarias para lograr la aplicación de tecnologías encaminadas a la reducción de los niveles de contaminación y de esta forma a la preservación del patrimonio cultural.

Referencias bibliográficas

- [1]. PADILLA R, SCHALM O, *et al.* Microanalytical characterization of surface decoration in Majolica pottery. *Analytica Chimica Acta*. 2005; 535(1-2): 201-211.
- [2]. PADILLA R, P.J.M. VAN ESPEN, *et al.* Compositional classification of archaeological pottery based on INA and SEM-EDX. *J. Trace Microprobe Tech.* 2003; 21(4): 677-695.
- [3]. HERRERA V, ORTUETA M, *et al.* Caracterización de materiales (pigmentos y cerámicas) para la conservación del patrimonio cultural y social en ciudad de La Habana. *Nucleus*. 2019; (66): 18-21.
- [4]. BOLAÑOS L, CABAL A, *et al.* Sistema de detección de rayos x para obtener imágenes digitales en el estudio de obras de arte. *Nucleus*. 2008; (43): 9-13.
- [5]. SCHALM O, CABAL A, VAN ESPEN P, *et al.* Improved radiographic methods for the investigation of paintings using laboratory and synchrotron X-ray sources. *J Anal At Spectrom.* 2011; 26: 1068-1077.
- [6]. LEYVA D, CABAL A, VAN ESPEN P, *et al.* Simulation and evaluation of the absorption edge subtraction technique in energy-resolved X-ray radiography applied to the cultural heritage studies. *Nucleus*. 2011; (50): 24-30.
- [7]. CABAL A, LEYVA D, SCHALM O, VAN ESPEN P. Possibilities of energy-resolved x-ray radiography for the investigation of paintings. *Anal. Bioanal. Chem.* 2012; 402(4): 1471-1480.
- [8]. CABAL A, SCHALM O, *et al.* Comparison of x-ray absorption and emission techniques for the investigation of paintings. *X-Ray Spectrom.* 2015; 44: 141-148.
- [9]. SCHALM O, LEYVA D, CABAL A, VAN ESPEN P, *et al.* Exploring the possibility of radiography in emission mode at higher energies: Improving the visualization of the internal structure of paintings. *Nucleus*. 2018; (64): 42-48.
- [10]. VAN DUIN P. Climate effects on museum objects. The need for monitoring and analysis. *Conservation Perspectives. The GCI Newsletter Fall.* 2014; 29(2): 13-15.
- [11]. ASHLEY-SMITH J. Challenges of managing collection environments, *Conservation Perspectives, The GCI Newsletter Fall.* 2018; 33(2): 4-9.
- [12]. LASCAR electronics: Temperature & Humidity Monitoring For Museums & Heritage. <https://www.lascarelectronics.com/applications/museums-exhibitions> [consulta: 13 febrero 2023].
- [13]. Vaisala: Humidity control in museums, archives and libraries. Available in: <https://www.vaisala.com/en/industries-applications/hvac-measurement/museums-archives-and-libraries> [consulta: 13 febrero 2023].
- [14]. Comprehensive monitoring of ambient conditions in museums and archives with the monitoring system testo. Available in: <https://static-int.testo.com/media/6b/d1/d12cb7b4668d/testo-160-Example-Application-EN.pdf/> [consulta: 13 de febrero de 2023].
- [15]. SensMax automated temperature and humidity monitoring system. Available in: <https://sensmax.eu/solutions/temperature-and-humidity-monitoring-for-museums-and-art-galleries/> [consulta: 13 de febrero de 2023].
- [16]. Hanwell. Heritage environmental monitoring solutions. Available in: <https://hanwell.com/app/uploads/Hanwell-brochure-heritage.pdf> [consulta: 13 de febrero de 2023].
- [17]. ONSET. Bluetooth Data Loggers Streamline Museum Environmental Monitoring. Available in: <https://www.onsetcomp.com/content/bluetooth-data-loggers-streamline-museum-environmental-monitoring> [consulta: 13 de febrero de 2023].
- [18]. MESAS CARRASCOSA F, VERDÚ SANTANO D, *et al.* Monitoring heritage buildings with open source hardware sensors: a case study of the mosque-cathedral of Córdoba. *Sensors*. 2016; 16(10): 1620-1634. doi:10.3390/s16101620.
- [19]. LECCESE F, CAGNETTI M, *et al.* A new acquisition and imaging system for environmental measurements: an experience on the Italian cultural heritage. *Sensors*. 2014; 14(5): 9290-9312. doi:10.3390/s140509290.
- [20]. GAUDENZI M, SERRA M, *et al.* The smARTS_Museum_V1: an open hardware device for remote monitoring of cultural heritage indoor environments. *HardwareX*. 2018; 4: e00028. doi.org/10.1016/j.ohx.2018.e00028
- [21]. LABORDA J, GARCIA AM, *et al.* From concept to validation of a wireless environmental sensor for the integral application of preventive conservation methodologies in low-budget museums. *Heritage Science*. 2022; 10: 197-214. doi.org/10.1186/s40494-022-00837-9.
- [22]. BORREGO S, MOLINA A. Fungal assessment on storerooms indoor environment in the National Museum of Fine Arts, Cuba. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2019; 12: 1373-1385. <https://doi.org/10.1007/s11869-019-00765-x>.
- [23]. ALMAGUER M, *et al.* Study of airborne fungus spores by viable and nonviable methods in Havana, Cuba. *Grana*. 2013; 52(4): 289-298. dx.doi.org/10.1080/00173134.2013.829869.

- [24]. VALLANT M. Biodeterioro del patrimonio histórico documental. Alternativas para su erradicación y control. Rio de Janeiro, 2013.
- [25]. RODRÍGUEZ LM, BRITO L, GOUVEIA BA. The WISE-MUSE project: Environmental monitoring and controlling of museums based on wireless sensor networks. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2009; 9(01): 46-57.
- [26]. MECOCCI A, ABRARDO A. Monitoring architectural heritage by wireless sensors networks: San Gimignano – A case study. *Sensors*. 2014; 14(1): 770-778. doi:10.3390/s140100770.
- [27]. KLEIN LJ, BERMUDEZ S, et. al. Wireless sensor platform for cultural heritage monitoring and modeling system. *Sensors*. 2017; 17(9): 1998- 2019. doi:10.3390/s17091998.
- [28]. VALENTINI F, CALCATERRA A, et. al. Smart portable devices suitable for cultural heritage: a review. *Sensors*. 2018; 18(8): 2434-2456. doi:10.3390/s18082434
- [29]. Semtech, Available in: <https://www.semtech.com/lora>. [consulta: 3 marzo 2023].
- [30]. The things network, Available in: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/>. [consulta: 3 de marzo de 2023].
- [31]. ARDUINO Corp. <https://www.arduino.cc/>. [consultado 3 marzo 2023].
- [32]. NC 26-211-1: 1992 Buenas prácticas de producción farmacéutica. Comité Estatal de Normalización Ministerio de Salud Pública. Vig. desde marzo 1992.

Recibido: 23 de enero de 2023

Aceptado: 17 de febrero de 2023

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en la realización, ni la comunicación del presente trabajo.

Credit / Conceptualización: Ana Ester Cabal Rodríguez, Lorenzo Hernández Tabares, Isabel Otero Abreu, Dania Rodríguez Nápoles, Piet Van Espen. **Curación de datos:** Ana Ester Cabal Rodríguez, Lorenzo Hernández Tabares, Isabel Otero Abreu, Dania Rodríguez Nápoles, Piet Van Espen. **Análisis formal:** Ana Ester Cabal Rodríguez, Lorenzo Hernández Tabares, Isabel Otero Abreu, Dania Rodríguez Nápoles, Piet Van Espen. **Adquisición de fondos:** Ana Ester Cabal Rodríguez, Piet Van Espen. **Investigación:** Ana Ester Cabal Rodríguez, Lorenzo Hernández Tabares, Isabel Otero Abreu, Dania Rodríguez Nápoles, Piet Van Espen. **Metodología:** Ana Ester Cabal Rodríguez, Lorenzo Hernández Tabares, Isabel Otero Abreu, Dania Rodríguez Nápoles, Piet Van Espen. **Software:** Lorenzo Hernández Tabares, Piet Van Espen. **Validación:** Ana Ester Cabal Rodríguez, Lorenzo Hernández Tabares, Isabel Otero Abreu, Dania Rodríguez Nápoles, Piet Van Espen. **Visualización:** Ana Ester Cabal Rodríguez, Lorenzo Hernández Tabares, Isabel Otero Abreu, Dania Rodríguez Nápoles, Piet Van Espen. **Escritura – borrador original:** Ana Ester Cabal Rodríguez. **Redacción – revisión y edición:** Ana Ester Cabal Rodríguez, Lorenzo Hernández Tabares, Isabel Otero Abreu, Dania Rodríguez Nápoles, Piet Van Espen.