



Geología y turismo: realidades complementarias

Arantza Aramburu Artano
Laura Damas Mollá
Juan José Durán Valsero
(editores)

Karrantza (Bizkaia), 22 a 25 de octubre de 2024

CaveDrop: sistema autónomo de monitoreo de gotas para el estudio de espeleotemas en cuevas

Ros Vivancos, A.

Tecminsa-Qalat, Cueva del Puerto. Alcántara 5, 30394 Cartagena.
andresros@outlook.com

Resumen

Este trabajo presenta CaveDrop, un dispositivo de código abierto diseñado para el monitoreo de la tasa de goteo en cuevas, proporcionando datos esenciales para estudios paleoclimáticos. El monitoreo preciso y continuo del goteo en formaciones espeleológicas es fundamental para comprender la formación de espeleotemas y las variaciones climáticas registradas en estas estructuras naturales. CaveDrop es una solución accesible, ensamblada con materiales de fácil adquisición en el mercado, lo que facilita su fabricación a pequeña escala y permite su uso en diversas condiciones de campo. Su diseño modular y flexible lo distingue de otros equipos comerciales que, aunque eficaces, presentan limitaciones en cuanto a personalización y costo. El sistema está basado en un microcontrolador ATmega328PB de bajo consumo energético y utiliza un sensor piezoeléctrico para detectar el impacto de gotas al caer sobre una superficie protectora. Los datos se registran en una tarjeta microSD con capacidad para almacenar millones de mediciones, permitiendo análisis prolongados en el tiempo. Las pruebas de campo iniciales realizadas en la cueva del Puerto, en Murcia, demostraron que CaveDrop es capaz de registrar gotas desde una altura mínima de 30 cm e incluso menos, y ofrece un rendimiento estable en diversas condiciones ambientales. Aunque se identificaron algunas limitaciones en la detección de gotas muy pequeñas o con un peso no detectable, CaveDrop ha mostrado ser una herramienta eficaz para la recopilación de datos en entornos extremos. Además, se ha implementado un sistema de retroalimentación visual mediante un LED que indica cuando se ha registrado un impacto, lo que facilita la verificación en tiempo real del funcionamiento del dispositivo. Los resultados sugieren que CaveDrop es una solución confiable y adaptable para investigaciones que requieren un monitoreo continuo en cuevas. Su capacidad para registrar datos de goteo con precisión lo convierte en una herramienta valiosa para estudios paleoclimáticos y espeleológicos, contribuyendo al análisis de variaciones climáticas y al entendimiento de las condiciones ambientales del pasado.

Palabras clave: contador de gotas, espeleotemas, sensor de impactos.

Abstract

This work presents CaveDrop, an open-source device designed for monitoring the drip rate in caves, providing essential data for paleoclimatic studies. Precise and continuous monitoring of drip rates in speleological formations is fundamental for understanding the formation of speleothems and the climatic variations recorded in these natural structures. CaveDrop is an accessible solution, assembled with easily available materials from the market, facilitating its small-scale production and enabling its use in various field conditions. Its modular and flexible design sets it apart from other commercial equipment, which, although effective, presents limitations in terms of customization and cost. The system is based on a low-power ATmega328PB microcontroller and uses a piezoelectric sensor to detect the impact of droplets falling onto a protective surface. The data are recorded on a microSD card with the capacity to store millions of measurements, allowing for long-term analysis. Initial field tests conducted in the cave of Puerto, in Murcia, demonstrated that CaveDrop is capable of registering droplets from a minimum height of 30 cm, and even less, while providing stable performance under various environmental conditions. Although some limitations were identified in detecting very small or undetectable droplets, CaveDrop has proven to be an effective tool for data collection in extreme environments. Additionally, a visual feedback system has been implemented via an LED, which indicates when an impact is registered, facilitating real-time verification of the device's operation. The results suggest that CaveDrop is a reliable and adaptable solution for research that requires continuous monitoring in caves. Its ability to accurately record drip data makes it a valuable tool for paleoclimatic and speleological studies, contributing to the analysis of climatic variations and the understanding of past environmental conditions.

Keywords: drip counter, impact sensor, speleothems.

Introducción

Los contadores de gotas son herramientas que se utilizan en estudios paleoclimáticos, ya que permiten registrar la tasa de goteo en cuevas, facilitando la obtención de datos necesarios para el análisis hidroquímico y la formación de espeleotemas. Al medir de manera precisa y constante la frecuencia del goteo, estos equipos proporcionan información fundamental para apoyar estudios sobre variaciones climáticas y la interpretación de registros paleoclimáticos. Aunque no analizan directamente los parámetros geoquímicos, su papel es esencial en la recolección de datos para dichos análisis.

Diversos trabajos se apoyaron en el uso de contadores de gotas. En el 2007 se llevó a cabo un estudio en seis cuevas de America del Norte (Beddows, 2007) donde se registraron la tasa de goteo en intervalos de 15 minutos, los resultados mostraron variabilidad en las tasas de goteo y los análisis de estas permitieron ver las variaciones hidroquímicas entre los puntos monitoreados. Se observó que los puntos de goteo con tasas constantes a lo largo del año (es decir, sin estacionalidad) mostraban una variación isotópica significativa, lo que sugiere que estos pueden proporcionar registros más continuos y confiables del clima a largo plazo. En contraste, otros puntos de goteo exhibían cambios estacionales en la tasa de goteo, pero no en la composición isotópica.

Los trabajos realizados la cueva Cathedral Cave, Wellington, Australia sobre los *Controls on cave drip water temperature and implications for speleothem-based paleoclimate reconstructions* (Rau et al., 2015) se utilizaron contadores de gotas automáticos, estos dispositivos registraron la frecuencia de goteo en intervalos de alta resolución y fueron fundamentales para vincular las variaciones en la tasa de goteo con los cambios de temperatura, tanto dentro de la cueva como en la superficie.

Un trabajo realizado en Natural Bridge Caverns, Texas, durante cuatro años (Oster et al., 2012), demostró que el monitoreo detallado de la tasa de goteo, combinado con mediciones geoquímicas, es eficaz para interpretar mejor los registros paleoclimáticos, ya que ayuda a identificar los mecanismos detrás de las variaciones en la química del agua de goteo, particularmente en relación con la precipitación de calcita controlada por la ventilación de la cueva.

La eficacia del monitoreo es alta, ya que permite identificar qué estalagmitas pueden ofrecer registros paleoclimáticos sin sesgos estacionales. El monitoreo de las gotas en cuevas también ayuda a comprender cómo varían los parámetros hidroquímicos y cómo estas variaciones se reflejan en la formación de las estalagmitas.

La disponibilidad de diversos sensores electrónicos en el mercado, como sensores de temperatura, humedad, CO₂, impactos y acelerómetro está permitiendo el desarrollo de instrumentos de control y medida que facilitan la investigación, incluyendo la de cuevas y sus entornos. La gran variedad de elementos electrónicos y su relativa facilidad de ensamblaje, junto con lenguajes de programación accesibles, están posibilitando la creación de equipos adaptados a entornos especiales, como las cavidades.

El mercado de equipos de mediciones para cuevas es escaso y no muy amplio, y no siempre

suelen reunir las características de estanqueidad y autonomía necesarias para estos entornos. Equipos comerciales como *Stalagmate* de PiTech Research Ltd, o *Stalactite Drip Count Loggers* de Goodsell Systems, son equipos disponibles en el mercado con unas líneas fijas de funcionamiento que limitan su modificación o ajustes según las posibles necesidades.

Actualmente el mercado permite el desarrollo a pequeña escala de equipos específicos que suelen realizarse por expertos involucrados en el mundo de la espeleología. En este contexto, se presenta CaveDrop, un equipo de código abierto, diseñado específicamente para entornos extremos como las cavidades, que permite detectar el impacto de gotas al caer sobre la tapa, lo que constituye el objeto de la presente comunicación.

CaveDrop es un proyecto de código abierto para contar gotas utilizando materiales fáciles de encontrar en el mercado y permite su ensamblaje con pocas dificultades, al ser de código abierto este puede ser modificado y adaptado según necesidades, periodos de goteo o añadir nuevos sensores como temperatura, humedad entre otros.

A pesar de los avances en el monitoreo de gotas, los dispositivos actuales aún presentan limitaciones en cuanto a personalización y costos. Aquí presentamos CaveDrop, una solución accesible y flexible para superar estas barreras.

Metodología

El desarrollo de CaveDrop se ha basado en varios proyectos similares como; *Stalagmate* de Dave Matthey, desarrollado por PiTech Research Ltd, *Stalactite Drip Count Loggers* de Goodsell Systems, o *Drip Sensor for Cave Research* de Edward K. Mallon. Basándose en estos, se ensayaron diversos microcontroladores y sensores para crear un equipo compacto y accesible.

Inicialmente, se utilizó la base del proyecto de (Mallon, 2017a y b; Mallon y Beddows, 2018), que describe detalladamente los equipos, ensamblaje y código. Pero su desarrollo limita el uso de las tarjetas microSD, debido a problemas de compatibilidad, su modelo utiliza el acelerómetro ADXL345, que también eleva el consumo. En un segundo prototipo utilizamos placas de desarrollo basadas en el chip ESP32 de (ESP32, 2024), que ofrecen amplias prestaciones para entorno con red de energía permanente, pero limitados en proyectos autónomos por su alto consumo.

Finalmente, se seleccionó el microcontrolador ATmega328PB, de bajo consumo, basado en la arquitectura RISC mejorada de AVR de (Microchip 2017), (foto1). En lugar del acelerómetro ADXL345, se empleó un sensor piezoeléctrico que no tiene consumo de energía y detecta los impactos con alta sensibilidad. Para la memoria, se optó por un módulo OpenLog (Sparkfun 2021), que admite tarjetas microSD de hasta 32Gb, y un módulo de reloj DS3231 para registrar la fecha y hora de los registros. Se añadió un mini interruptor DIP de cuatro posiciones para encendido/apagado y selección de tiempos de registro (1 minuto, 10 minutos, 1 hora).

El equipo es alimentado por tres baterías recargables NH de 1.2V y 2400mAh, con opción de utilizar baterías de mayor capacidad para mayor autonomía. Se diseñó una placa PCB específica para CaveDrop por PCBWay, permitiendo una disposición estable y firme de todos los módulos.

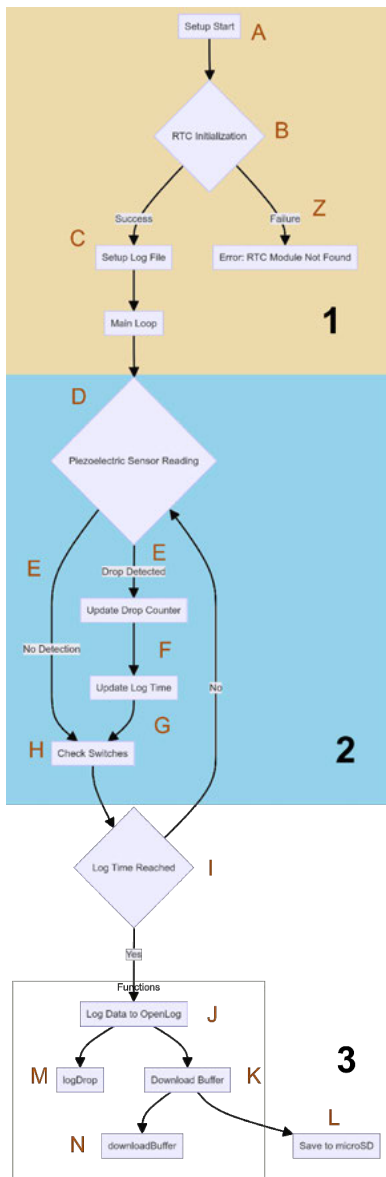


Figura 1. Diagrama de funcionamiento. Bloque 1; puesta en marcha A, se inicia el reloj verifica la hora B, inicia registro de configuración, comienza bucle principal C. Bloque 2; lectura del sensor piezométrico D, Impacto detectado E, actualiza contador y registra la hora F, comprueba selección tiempo de registros H. Bloque 3; cuando alcanza tiempo de registro I, lo graba temporalmente en la memoria del módulo OpenLog J, K, cuando se llega al tiempo previsto de descarga de la memoria temporal se graba en la microSD K, L

Los datos se archivan en la tarjeta microSD en formato TXT, con registros de fecha, hora, minuto y número de gotas. La tarjeta microSD de 1Gb permite almacenar alrededor de 35 millones de registros, suficiente para unos amplios muestreos. El código se realiza en C de Arduino, un

lenguaje accesible y eficaz para el uso requerido; en la figura 1 se muestran los bloques de funcionamiento de este programa, este se encuentra disponible con las actualizaciones en el repositorio técnico <https://github.com/Andres-ros/CAVEDROP>

El equipo permite añadir y configurar sensores adicionales, es viable, aunque la situación extrema a la que van a estar sometidos, agua constante, no se recomienda, colocarlos en su interior pueden falsear los datos debido a la temperatura que se puede generar por los módulos electrónicos internos, en su lugar mejor optar por equipos externos adicionales para medidas con sensores de temperatura, humedad y CO₂.

El dispositivo (figuras 2 y 3) se aloja en un bote de plástico translúcido con tapa de rosca plana de 250 ml, que evita la acumulación de gotas de agua en la superficie. Este modelo inicial no tiene elementos externos de conexión, conectores USB o de alimentación, interruptores, lo que facilita la estanqueidad contra la intensa humedad que van a estar sometidos. Para su colocación en las cavidades, debe ser estable y horizontal para alcanzar la mayor efectividad de los impactos, en caso de suelos no horizontales aconsejamos el uso de bolsas de tela o incluso un calcetín con arena lavada para asegurar una superficie estable.

Resultados

La selección de los registros de datos se controla mediante un bloque de cuatro interruptores DIP: el primero para encender el equipo, y los otros tres para seleccionar los intervalos de registro (1 minuto, 10 minutos o 1 hora). Este diseño permite flexibilidad en la recolección de datos, ajustándose a las necesidades de cada experimento. El circuito está ensamblado en una placa PCB compacta, con el sensor de impactos conectado a través de micro conectores JST-PH 2.0, lo que facilita su montaje y desmontaje en el bote protector.

Los datos se almacenan en formato TXT en una tarjeta microSD, con una capacidad de hasta 35 millones de registros. Esto es suficiente para estudios prolongados, incluso en condiciones de campo. La estructura de los registros incluye fecha, hora, minuto y número de gotas, lo que permite un análisis detallado del comportamiento de goteo en intervalos definidos. El código, programado en C para Arduino, está disponible en un repositorio de código abierto para actualizaciones y modificaciones futuras (<https://github.com/Andres-ros/CAVEDROP>).

En pruebas de campo iniciales, realizadas en la cueva del Puerto (Murcia), el equipo demostró su eficacia para registrar gotas a una altura mínima de 30 cm, con una buena respuesta del sensor piezoeléctrico ante diferentes tamaños de gotas. En la Figura 4, se muestra un ejemplo de los datos obtenidos en intervalos de un minuto.

Los resultados indican que CaveDrop es capaz de adaptarse a diversas situaciones de campo, proporcionando datos precisos y consistentes. Sin embargo, se identificaron ciertas limitaciones en la detección de gotas muy pequeñas o de peso no detectable, lo que sugiere la necesidad de ajustes a la hora de situar el dispositivo, para facilitar la detección de gotas se ha incorporado un Led que se enciende con cada impacto.

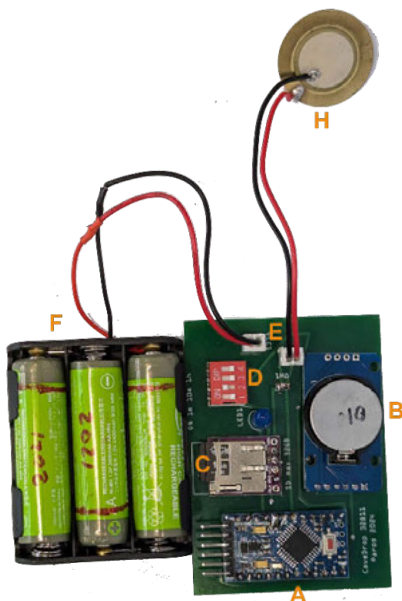


Figura 2. A microcontrolador ATmega328PB, B, Reloj RTC DS3231, C, módulo OpenLog tarjetas microSD. D, micro interruptores de selección, E, Micro conectores sensor y baterías, F, baterías NH 1,2V 2.400mAh, H, Sensor vibraciones

Discusión

El uso de sensores piezoeléctricos para la detección de impactos en el CaveDrop presenta ciertas limitaciones relacionadas con el tamaño y peso de las gotas. Como se observó en las pruebas de campo, gotas pequeñas que caen desde una gran altura pueden generar un impulso similar al de gotas más grandes que caen desde una distancia menor, lo que complica la calibración precisa del dispositivo. Esta es una limitación inherente a los sensores piezoeléctricos y acelerómetros que también ha sido señalada en estudios previos, como el de Mallon et al. (2017 a, b), donde se enfrentaron a dificultades similares.



Figura 3. Izquierda, equipo dentro del bote. Derecha, bote en posición de registro de gotas

El uso de sensores piezoeléctricos para la detección de impactos en CaveDrop presenta ciertos retos relacionados con el tamaño y el peso de las gotas, los cuales dependen de factores físicos que se pueden modelar mediante la fórmula de equilibrio entre gravedad y tensión superficial:

$$mg = \pi d \gamma$$

donde:

- m es la masa de la gota,
- g es la aceleración de la gravedad,
- d es el diámetro de la punta de la estalactita,
- γ es la tensión superficial del agua.

Esta fórmula nos ayuda a entender el tamaño máximo que una gota puede alcanzar antes de que la gravedad supere la tensión superficial y la haga caer. Cuanto más pequeño sea el diámetro de la estalactita, más pequeñas serán las gotas, y esto tiene un impacto directo en la capacidad del sensor piezoeléctrico para detectar gotas con diferentes características [https://en.wikipedia.org/wiki/Drop_\(liquid\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Drop_(liquid)).

Las pruebas de campo indicaron que el sensor piezoeléctrico de CaveDrop requiere una gota con un peso mínimo para generar un impulso detectable. Esto significa que en condiciones donde las gotas son demasiado pequeñas o caen desde una altura muy corta, el sensor puede no ser capaz de registrar el impacto de manera consistente. Sin embargo, una gota grande que cae desde una menor distancia puede generar un impulso similar al de una gota pequeña que cae desde una altura mayor, lo que introduce complejidad en la calibración del sensor y a realizar pruebas previas para su óptimo funcionamiento.

```

Fecha y hora actuales: 2024/9/16 11:39:16
new RegistroGotas.txt
append RegistroGotas.txt
CaveDrop 328
v113CC_003
Fecha, hora, gotas
2024-09-16,11:40,36
2024-09-16,11:41,0
2024-09-16,11:42,0
2024-09-16,11:43,0
2024-09-16,11:44,0
2024-09-16,11:45,0
2024-09-16,11:46,0
2024-09-16,11:47,0
2024-09-16,11:48,0
2024-09-16,11:49,14
2024-09-16,11:50,8
2024-09-16,11:51,0
2024-09-16,11:52,0
2024-09-16,11:53,0

```

Figura 4. Ejemplo de datos obtenidos en periodos de un minuto con CaveDrop

Comparado con otros sistemas como Stalagmate, CaveDrop ofrece la ventaja de ser personalizable, lo que permite ajustar los umbrales de sensibilidad del sensor dependiendo de las características del entorno y de las gotas.

El diseño modular de CaveDrop, le permite ser adaptable a distintas situaciones, pero es esencial realizar pruebas previas para optimizar su rendimiento en condiciones extremas de temperatura y humedad. Estas variaciones en las características físicas de las gotas pueden influir en el impacto detectado y, por lo tanto, en la precisión de los registros.

Finalmente, los resultados obtenidos demuestran que CaveDrop es una solución eficaz para el monitoreo de gotas en cuevas y su potencial para estudios paleoclimáticos es considerable.

Conclusiones

CaveDrop se destaca como una solución abierta como herramienta de apoyo para la investigación paleoclimática, ofreciendo un sistema automatizado y eficiente para el monitoreo de gotas en cuevas. La precisión en la detección de gotas permite recoger datos fundamentales sobre la frecuencia de goteo en diversas formaciones espeleológicas, lo que ayuda en el análisis de los registros climáticos presentes en los espeleotemas y, a su vez, en la reconstrucción de climas pasados.

Una de las principales ventajas de CaveDrop radica en su diseño basado en código abierto, que ofrece una flexibilidad extraordinaria para adaptar el dispositivo a situaciones específicas. Los investigadores pueden modificar tanto el hardware como el software según las necesidades concretas de cada entorno o proyecto, permitiendo la integración de sensores adicionales, como aquellos que miden temperatura, humedad o CO₂. Esta capacidad de personalización permite correlacionar las tasas de goteo con las condiciones ambientales dentro de las cuevas, lo que maximiza su versatilidad y valor en una amplia gama de investigaciones.

Además, el uso de materiales de fácil acceso en el mercado reduce significativamente los costos de fabricación y permite la producción de estos dispositivos a pequeña escala. Esto democratiza su uso, eliminando la dependencia de costosos equipos comerciales para realizar investigaciones de alta calidad en cuevas. Los investigadores pueden ensamblar el dispositivo con materiales comunes, manteniendo los gastos bajos y asegurando una amplia disponibilidad para proyectos de investigación que necesiten herramientas confiables, versátiles y de bajo coste.

Como herramienta de investigación, CaveDrop no solo automatiza el proceso de recolección de datos, sino que también brinda una solución escalable para estudios paleoclimáticos y espeleológicos de diversas magnitudes. Su diseño modular permite su integración en diferentes tipos de estudios, tanto en pequeñas investigaciones locales como en proyectos más amplios y geográficamente diversos. Su capacidad para registrar datos precisos y constantes sobre el goteo facilita la interpretación de los registros climáticos almacenados en espeleotemas, información esencial para reconstruir las condiciones ambientales de tiempos pasados y para comprender los cambios climáticos a lo largo del tiempo. En este sentido, CaveDrop no solo contribuye a estudios históricos, sino que también puede tener un papel importante en investigaciones sobre el cambio climático actual y sus impactos futuros.

Referencias

- Repositorio Técnico y actualizaciones en Github <https://github.com/Andres-ros/CAVEDROP>
- Beddows P. (2007). Cave-Drip Monitoring as a Foundation for Better Paleoclimate Reconstruction. National Cave and Karst Management Symposium 2007.
- ESP32 (2024) Technical Reference Manual, Espressif Systems.
- Mallon K.E. (2017a). Cave Pearl Data Logger: DRIP Sensor Configuration. <https://www.researchgate.net>.
- Mallon, K.E..(2017b) How to Build an Arduino Data Logger; The Cave Pearl Project.. Available online: <https://thecavepearlproject.org/how-to-build-an-arduino-data-logger>.
- Mallon K.E., Beddows P. (2018). Cave Pearl Data Logger: A Flexible Arduino-Based Logging Platform for Long-Term Monitoring in Harsh Environment. *Sensors* 2018, 18, 530; doi:10.3390/s18020530.
- Microchip (2017) ATmega328PB Datasheet. Microchip Technology Inc.
- Rau G., Cuthbert M., Andersen M., Baker A., Rutledge H., Markowska M., Roshan H., Marjo C., Graham P, Acworth I, (2015). Controls on cave drip water temperature and implications for speleothem-based paleoclimate reconstructions, *Quaternary Science Reviews*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.03.026>
- Oster J.L, Montañez I. P, Kelley N.P. (2012) Response of a modern cave system to large seasonal precipitation variability. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 91 (2012) 92–108
- Sparkfun (2021) OpenLog Hookup Guide. Sparkfun.com.
- Spt-2024*