

Artículo científico

Estación móvil para la detección de dióxido de carbono en suelo volcánico

Mobile Station for the Detection of Carbon Dioxide in Volcanic Soil



DOI: <https://doi.org/10.5377/entorno.v1i78.19715>

URI: <http://hdl.handle.net/11298/1382>

David Adriel Solís Marroquín

Escuela de Ingeniería Eléctrica

Universidad de El Salvador

sm18043@ues.edu.sv

orcid.org/0009-0007-9726-932X

Jefry Orlando Comayagua Martínez

Universidad de El Salvador

Escuela de Ingeniería Eléctrica

cm15031@ues.edu.sv

orcid.org/0009-0003-6156-6112

Omar Otoniel Flores Cortez

Universidad Tecnológica de El Salvador

Investigador

omar.flores@utec.edu.sv

orcid.org/0000-0003-1754-4090

Carlos Osmín Pocasangre Jiménez

Universidad de El Salvador

Investigador

carlos.pocasangre@ues.edu.sv

orcid.org/0000-0002-7463-9873

Fernando Arévalo

Ruhr-Universitat Bochum, Alemania

Investigador

Fernando.ArevaloNavas@ruhr-uni-bochum.de

orcid.org/0000-0001-8664-2626

Benancio Henríquez Miranda

Universidad de El Salvador

Departamento de Física

benancio.henriquez@ues.edu.orcid.org/

orcid.org/0009-0006-1065-3429

Recibido: 23 de abril de 2024

Aprobado: 24 de agosto de 2024

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de una estación móvil de monitorización del dióxido de carbono (CO_2) basada en el sensor LI-830, disponible en la Escuela de Física de la Facultad Multidisciplinaria de Occidente de la Universidad de El Salvador. Mediante la integración de tecnologías actuales de bajo coste, se mejoró la eficiencia y utilidad del sensor LI-830. En concreto, se implementó la transmisión de datos mediante tecnología GPRS, lo que permitió la transferencia instantánea de datos a una base de datos en línea. Esta integración simplificó la gestión de los datos y facilitó análisis detallados a los investigadores. Además, se desarrolló una herramienta en línea que representa gráficamente los resultados, lo que mejora la interpretabilidad de la información recogida. Este trabajo contribuye significativamente a reforzar la eficacia de la estación móvil para la monitorización del CO_2 en laderas volcánicas.

Palabras clave

Santa Ana (El Salvador), volcanes, investigaciones, dióxido de carbono, química atmosférica, estado atmosférico, efecto de las erupciones volcánicas, innovaciones tecnológicas.

Abstract

This article presents the development of a mobile carbon dioxide (CO_2) monitoring station based on the LI-830 sensor, available at the School of Physics of the Multidisciplinary Faculty at Universidad de El Salvador. The efficiency and usefulness of the LI-830 sensor were enhanced through the integration of current low-cost technologies. In particular, the data transmission was implemented using GPRS technology, allowing for immediate transfer of data to an online database. This integration simplified data management and facilitated a detailed analysis for researchers. Additionally, an online visual dashboard was developed to graphically represent the results, thus improving the interpretation capacity of the collected information. This work significantly strengthens the effectiveness of the mobile station for CO_2 monitoring on volcanic slopes.

Keywords

Santa Ana (El Salvador), volcanoes, research, carbon dioxide, atmospheric chemistry, atmospheric state, volcanic eruption effects, technological innovations.

Introducción

La necesidad de comprender mejor las fuentes y patrones de las emisiones de CO_2 ha impulsado la investigación para el desarrollo de tecnologías de monitorización más eficientes y flexibles. El departamento de ciencias físicas de la Facultad Multidisciplinaria de Occidente de la Universidad de El Salvador cuenta con el sensor LI-830 (LI-COR, 2024) en su dotación de equipos. Se trata de un elemento de alto coste y excelente rendimiento en términos de precisión y fiabilidad a la hora de tomar lecturas de gas CO_2 en suelo. Sin embargo, no está equipado con una pantalla de visualización ni con transmisión de datos de su funcionamiento.

En trabajos anteriores se realizó un primer intento de modernizar las capacidades de comunicación de este sensor. En su primera versión, se diseñó una estación electrónica adaptable a la salida del sensor LI-830 que permitía visualizar la información de las lecturas a través de una aplicación para dispositivos Android. Un módulo Bluetooth conectaba al microcontrolador que, entre otras variables, estimaba el flujo de dióxido de carbono en un punto específico a través de regresión lineal aplicada a la variación de la concentración de CO_2 presentada con respecto al tiempo (Pocasangre et al., 2023).

En este sentido, el presente trabajo de investigación se centra en el diseño e implementación de mejoras en la estación móvil de monitorización de CO₂ utilizada en la Facultad Multidisciplinaria de Occidente de la Universidad de El Salvador, ya que su primera versión se presentó como una herramienta innovadora que buscaba superar las limitaciones de las estaciones fijas convencionales.

El objetivo de las mejoras es aumentar la eficiencia y accesibilidad en la recolección de datos. La nueva estación móvil desarrollada incorpora un sistema de transmisión a través de red celular que utiliza el protocolo GPRS (General Packet Radio Service) para canalizar la información directamente a una base de datos en línea en el servicio Google Sheets, que posteriormente se despliega en un sitio web. Esto permite respaldar los datos obtenidos en diversas localidades con mayor amplitud y flexibilidad. Este enfoque móvil no solo facilita la identificación de fuentes de emisión específicas, sino que también brinda la oportunidad de cartografiar los patrones de concentración de CO₂ en distintas zonas geográficas.

Esta integración tecnológica no solo simplifica la gestión de los datos, sino que también permite una mejor monitorización y una colaboración más eficaz entre investigadores y responsables de la toma de decisiones.

La estación móvil de monitorización realiza la lectura de la concentración de CO₂ en un punto concreto mediante el sensor. La cámara de acumulación se coloca en el suelo y la estación móvil, que está contenida en una maleta, consta del sensor LICOR LI-830, que se encarga de la lectura de la concentración de CO₂. Véase la figura 1.

El sensor utiliza una fuente de luz infrarroja que se emite a través de una cámara de referencia y una cámara de medición. La cámara de referencia contiene aire limpio sin CO₂, mientras que la cámara de medición contiene la muestra de gas que se está

analizando. La luz infrarroja se transmite a través de ambas cámaras y se detecta en el otro extremo mediante un detector de luz. La cantidad de luz detectada en la cámara de referencia se compara con la cantidad de luz detectada en la cámara de medición, y la diferencia en la cantidad de luz absorbida por el CO₂ en la muestra de gas se utiliza para determinar la concentración de CO₂ en el aire (Yimmy Yang et al., 2024; Pérez-Zárate et al., 2024). Esta integración tecnológica no solo simplifica la gestión de los datos, sino que también permite una mejor monitorización y una colaboración más eficaz entre investigadores y responsables de la toma de decisiones.

La estación móvil de monitorización realiza la lectura de la concentración de CO₂ en un punto concreto mediante el sensor. La cámara de acumulación se coloca en el suelo y la estación móvil, que está contenida en una maleta, consta del sensor LICOR LI-830, que se encarga de la lectura de la concentración de CO₂. Véase la figura 1.

El sensor utiliza una fuente de luz infrarroja que se emite a través de una cámara de referencia y una cámara de medición. La cámara de referencia contiene aire limpio sin CO₂, mientras que la cámara de medición contiene la muestra de gas que se está analizando. La luz infrarroja se transmite a través de ambas cámaras y se detecta en el otro extremo mediante un detector de luz. La cantidad de luz detectada en la cámara de referencia se compara con la cantidad de luz detectada en la cámara de medición, y la diferencia en la cantidad de luz absorbida por el CO₂ en la muestra de gas se utiliza para determinar la concentración de CO₂ en el aire (Yimmy Yang et al., 2024; Pérez-Zárate et al., 2024). La figura 1 muestra el sistema de sensores para la lectura de la concentración de CO₂. Se puede observar que hay dos mangueras conectadas a la cámara: una de ellas succiona el gas gracias a una bomba de succión y lo lleva al sensor electroóptico LI-830, donde se pueden leer los resultados a través del puerto serial disponible en el mismo sensor.

Figura 1. Carcasa del sensor y cámara de acumulación de CO₂ en suelos



Nota. La caja que contiene el elemento sensor y la bomba de circulación se muestra junto a la campana de acumulación donde se recoge el gas CO₂ que se va a medir. Fuente: Beijing Laikoo Biotechnology (2024). Desarrollado por Beijing Laikoo Biotechnology (2024).

Desarrollo del hardware del sistema

El rediseño del hardware implica cambios significativos, como la sustitución del microcontrolador, la adición del módulo transceptor de red celular y de un módulo timestamp, así como la sustitución del módulo convertidor DC-DC, anteriormente un LM2596, por un módulo convertidor DC-DC con tecnología QC3. A continuación se presenta un resumen de las características técnicas de los principales componentes del sistema propuesto.

Sensor de temperatura y humedad DTH22:

Se trata de un sensor de temperatura y humedad relativa de alta precisión. El DHT22 se comunica a través de un único cable de datos utilizando el protocolo de comunicación de bus único, lo que facilita su uso con microcontroladores y dispositivos electrónicos. El sensor DHT22 tiene una resolución de desarrollo del hardware del sistema 0,1 °C para la medición de la temperatura y del 0,1 % para la medición de la humedad relativa. La medición se

realiza en la estación cada 10 segundos, dando prioridad a la información obtenida de la medición del LI-COR 830 (Salazar, 2023).

Módulo GPS Neo 6M:

Se trata de un módulo GPS que utiliza el sistema de navegación para proporcionar información de posición precisa y fiable. Utiliza una antena cerámica para recibir señales GPS y puede recibir señales de hasta 22 satélites simultáneamente. Tiene un bajo consumo de energía, lo que lo hace adecuado para proyectos de bajo consumo, y funciona con una tensión de alimentación de 3,3 V o 5 V (Milner, 2016).

Módulo conversor Max232:

La conexión entre el microcontrolador y el sensor LI-830 no puede realizarse directamente porque el protocolo RS232 utiliza variaciones de tensión que van de -13 V a 13 V, mientras que el microcontrolador

funciona a un nivel de tensión TTL de 3,3 V/5 V. Para resolver este problema, se utiliza un conversor de nivel lógico MAX232 que convierte las señales de transmisión serie RS232 a niveles TTL y viceversa. El MAX232 es un circuito integrado que genera tensiones positivas y negativas a partir de una única fuente de alimentación (Viswanatha et al., 2022).

Relé de 5 V y 1 canal

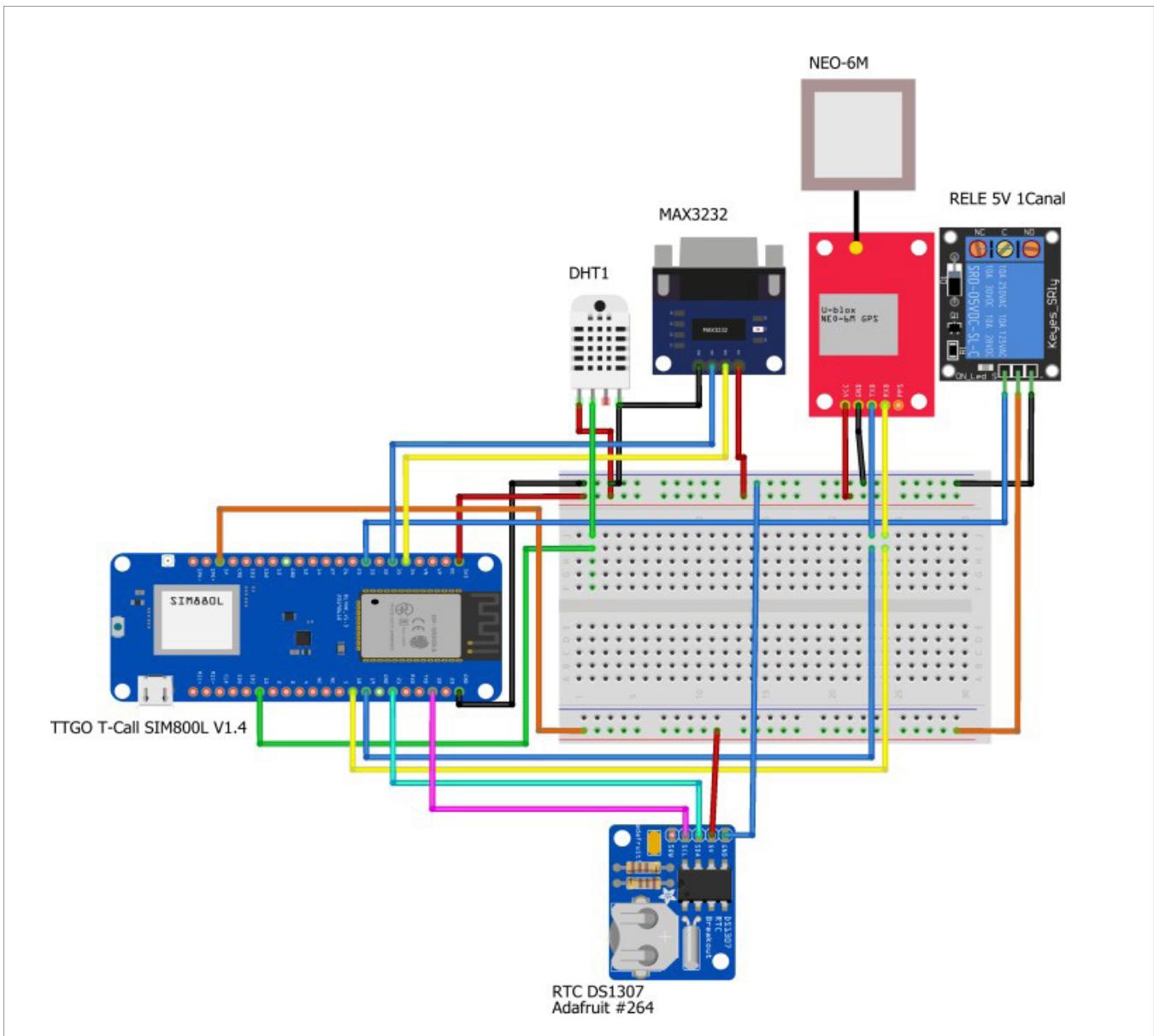
El relé de 5 V y 1 canal es un dispositivo electromecánico que se utiliza para controlar el encendido y apagado de cargas eléctricas mediante una señal de entrada digital. Controla la bomba del equipo de medida mediante una señal enviada desde la aplicación Android desarrollada. Su función es controlar la eficiencia energética del equipo, ya que la bomba consume mucha energía al encenderse.

Microcontrolador SIM800L

Se trata de un dispositivo de desarrollo compacto y versátil que combina funcionalidades de comunicación

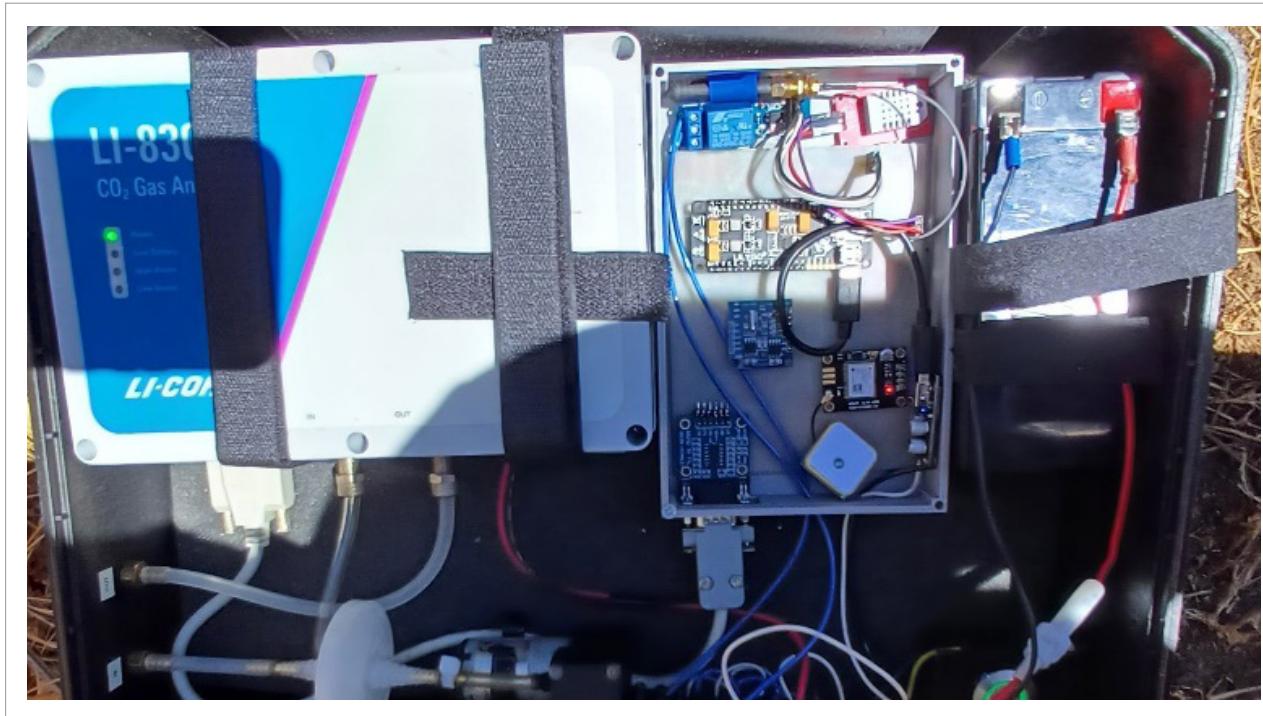
y conectividad. Esta placa está equipada con un módulo SIM800L, que permite la comunicación GSM/GPRS, facilitando la transmisión de datos a través de redes móviles. Integra un microcontrolador ESP32 que proporciona capacidad de procesamiento y conectividad wifi y Bluetooth (Atif et al., 2020). Esta combinación de tecnologías hace que la placa sea adecuada para aplicaciones de internet de las cosas (IoT). La placa TTGO T-CALL SIM800L TTGO también cuenta con una ranura para tarjeta SIM, un conector de antena GSM y varios pines de entrada/salida, lo que la hace adaptable a diferentes aplicaciones. Esta placa es una herramienta útil para proyectos que requieran comunicación a través de redes móviles y que busquen integrar capacidades de Internet de las Cosas en un formato compacto y fácil de usar (Huancá Chávez y Choque Choque, 2022). La figura 2 muestra el diagrama esquemático de conexiones diseñado para la estación electrónica del sistema propuesto, mientras que la figura 3 muestra su implementación física.

Figura 2. Diagrama esquemático para la estación electrónica



Nota. La imagen muestra el esquema de conexión de los componentes de la estación electrónica del sistema propuesto. Fuente: elaboración propia.

Figura 3: Estación electrónica implementada



Nota. La imagen muestra la implementación de la estación electrónica junto con el sensor LI-830.

Fuente: diseño propio.

Desarrollo del software del sistema

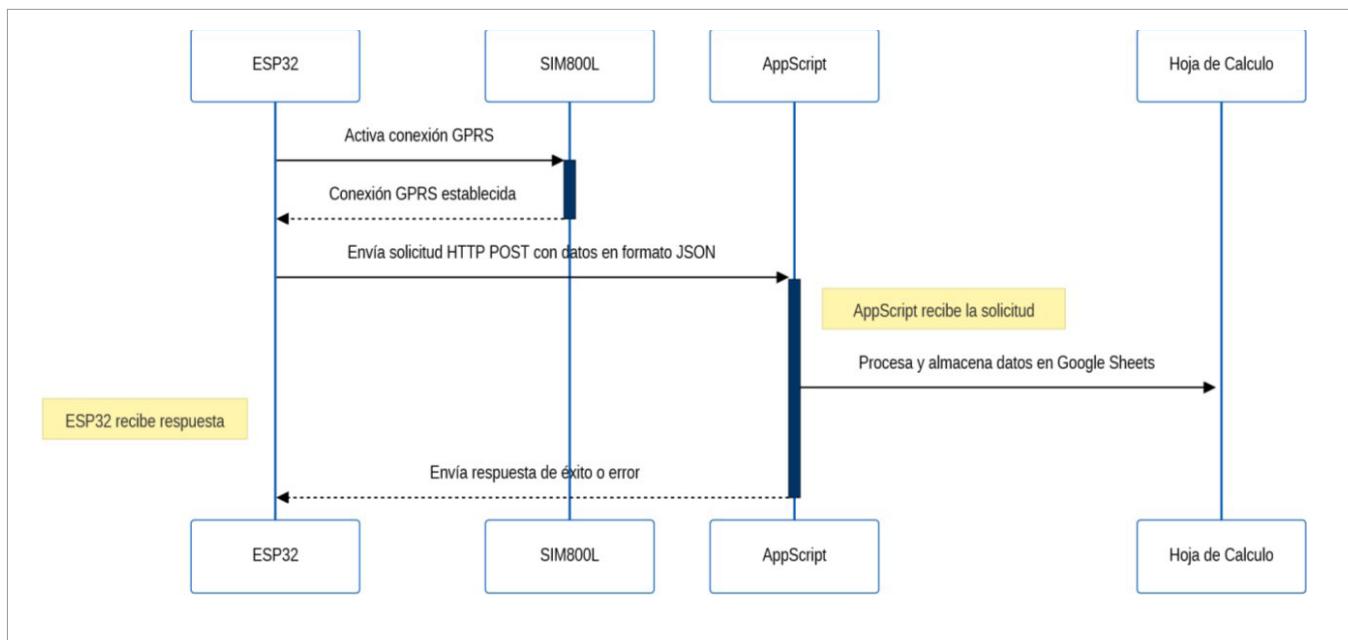
Software para la estación electrónica

El programa de control dentro de la Unidad Central de Procesamiento (CPU) del microcontrolador ESP32 de la estación electrónica se divide en tres funciones principales: la comunicación Bluetooth, la lectura de los sensores y el almacenamiento temporal de los datos que se enviarán a Google Sheets.

La función encargada de leer la concentración de CO₂ está condicionada a la comunicación en serie con el módulo MAX232, encargado de recibir los datos del LI-COR 830. Dado que la frecuencia de recepción es de un segundo, se realiza una validación para evitar almacenar valores inferiores a 200 ppm, considerados como errores en la comunicación serie. La función registra la hora actual, la guarda y genera una cadena o trama de datos principal con variables globales. La concentración de CO₂ se actualiza cada segundo. En cuanto a la geolocalización, los datos

se actualizan cada 10 segundos y es posible detener la actualización cuando se está realizando una medición en un punto. La CPU en su totalidad es controlada por la aplicación Android de la misma forma para las nuevas funcionalidades o tareas. En cuanto al almacenamiento, el programa recibe una orden por Bluetooth en el momento de encender la bomba o activar el relé. El programa inicia un guardado temporal de datos en la memoria RAM del microcontrolador mediante una estructura declarada en el programa que almacena cada fotograma y, adicionalmente, la hora en la que se capturaron. El guardado se detiene cuando la bomba de sección se desenergiza y se establece un paquete de datos listo para ser enviado a una hoja de cálculo de Google Sheets. En cuanto al envío de datos vía GPRS, primero se busca formatear el paquete guardado en una estructura JSON y, a continuación, se realiza una petición HTTP POST a Google App Script, que está asociada a una hoja de cálculo de Google Sheets y está diseñada para procesar y manejar los datos recibidos. Para ello, itera sobre la matriz JSON y extrae cada valor formateando una nueva fila que se añade a la hoja de cálculo.

Figura 4. Diagrama de secuencia de funcionamiento del software para estación electrónica



Nota. Diagrama que especifica la secuencia de funciones que debe realizar el programa de control para la CPU de la estación electrónica. Fuente: diseño propio.

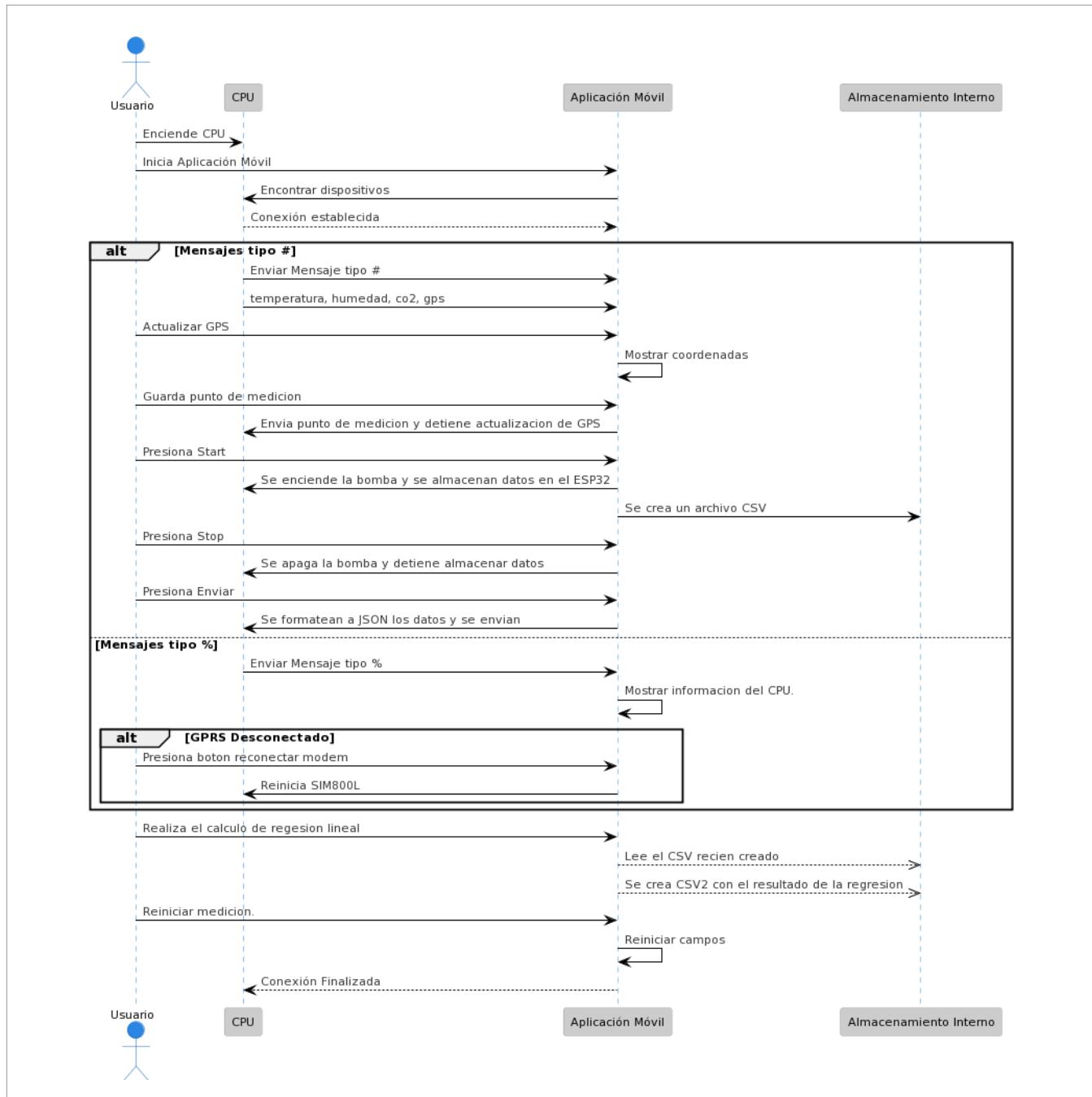
Software de aplicación para Android

Esta versión introduce mejoras sustanciales en la interfaz de usuario, la gestión de permisos y la eficiencia en la comunicación Bluetooth, y destaca la importancia de adaptarse a las actualizaciones de seguridad y funcionalidad de los modernos sistemas operativos frente a la evolución de Android (Orellana, 2021). Ahora se advierte proactivamente al usuario sobre el uso de permisos, solucionando el error *SecurityException* que cerraba la aplicación.

La comunicación Bluetooth se ha perfeccionado de tal forma que ahora solo hay una transferencia constante en toda la interfaz; es decir, solo algunos componentes dejan de actualizarse cuando se pausa la generación de la gráfica CO₂ vs. tiempo, como el *TextView* que muestra la información del GPS cuando se pausa dicha generación. Este gráfico se genera redibujándose cada vez que se actualiza la matriz que contiene los

datos de CO₂ recibidos, dando la impresión de ser un gráfico dinámico. En cuanto a la adición de botones, se incluye el botón Enviar, que envía un comando a través de Bluetooth a la CPU para indicarle que formatee los datos en una estructura JSON y realice la solicitud HTTP POST al servicio AppScript (Google Workspace, 2023). Además, se añade un botón Reiniciar, que reinicia la GUI de la aplicación para realizar una nueva medición. La actualización muestra un panel de información de la CPU que indica si hay conexión GPRS, si el GPS está activo y el estado de guardado y envío de datos. En el guardado de datos en la memoria interna del teléfono, estos se guardan según el número de mediciones y no según el número de puntos como antes, y se reestructura el archivo CSV para que tenga la misma organización que los datos guardados en la hoja de cálculo. El siguiente diagrama de secuencia de la figura 5 muestra la interacción del usuario con la aplicación y la CPU.

Figura 5. Diagrama de secuencia para la aplicación de control Android



Nota. Se muestra el diagrama de secuencia de funciones que hay que considerar en el diseño de la aplicación de control que se va a ejecutar en un dispositivo móvil. Fuente: elaboración propia.

Aplicación web

Se desarrolló una plataforma en Python para presentar los resultados de las mediciones. Permite visualizar datos históricos de forma interactiva y realizar regresiones lineales para obtener perfiles de flujo de CO₂ en la línea de medida. Para obtener los datos de una hoja de cálculo en Python, es necesario establecer una conexión con la API de Google Sheets, que permite leer y escribir en ella. Para el proyecto de Python, es necesario crear una cuenta de servicio (Google Cloud, 2024) y sus credenciales para la autenticación, la seguridad y el cumplimiento de las políticas de Google. Se utiliza la librería Dash by Plotly para analizar los datos y crear el panel de control disponible en la aplicación web interactiva que muestra visualizaciones de datos en tiempo real (Burch y Schmid, 2024).

Para la visualización y la apariencia, se trabaja con el *app layout*, que es la estructura y el diseño de una aplicación web que actúa como el esqueleto sobre el que se construye la presentación visual y la interactividad. En una aplicación Dash, el diseño se define como un árbol de componentes que incluye elementos HTML y específicos de Dash, como gráficos y menús desplegables. Se pueden aplicar estilos CSS para personalizar la apariencia de los componentes, ya sea directamente en cada uno de ellos o mediante hojas de estilo externas. Además, los componentes del diseño pueden actualizarse dinámicamente mediante *callbacks*, lo que permite la interactividad de la aplicación, por ejemplo, la actualización de un gráfico en respuesta a la selección del usuario en un menú desplegable.

A continuación, se explica la secuencia que se lleva a cabo para el despliegue del cuadro de mandos.

El diagrama de secuencia ilustra el flujo de interacción entre el usuario, la aplicación Dash, la API de Google Sheets, las operaciones DataFrame, la visualización y el modelo de regresión lineal (DataScientest, 2023).

1. Acceso del usuario a la aplicación Dash: el proceso comienza cuando el usuario accede a ella. Este es el punto de entrada para interactuar con la aplicación, que muestra los datos y permite hacer análisis.
2. Solicitud de datos a la API de Google Sheets: La aplicación Dash solicita datos a la API de Google Sheets. Este paso es crucial para obtener los datos necesarios para procesarlos y visualizarlos en la aplicación.
3. Suministro de datos por parte de la API de Google Sheets a las operaciones DataFrame: la API de Google Sheets proporciona los datos solicitados a DataFrame Operations. Aquí, los datos en bruto se reciben y están listos para ser procesados.
4. Procesamiento de datos: Las operaciones DataFrame procesan los datos. Este paso puede incluir la limpieza, el filtrado, la transformación y la preparación de los datos para su análisis y visualización.
5. Envío de los datos procesados al componente de visualización: una vez procesados, los datos se envían a dicho componente. Este componente se encarga de crear gráficos y visualizaciones basados en dichos datos.
6. Visualización de gráficos en la aplicación Dash: la aplicación Dash recibe los gráficos del componente de visualización y los muestra al usuario. Este es el primer punto donde el usuario puede interactuar visualmente con los datos.
7. Selección de filtros por parte del usuario: el usuario selecciona los filtros a través de la interfaz de la aplicación Dash. Estos filtros pueden ser por fecha, punto de datos u otros criterios relevantes para el análisis.
8. Aplicación de filtros a los datos: La aplicación Dash aplica estos filtros mediante operaciones DataFrame. A continuación, los datos se actualizan para reflejar únicamente la información filtrada.
9. Actualización de gráficos con datos filtrados: los datos filtrados se envían de vuelta al componente

de visualización para actualizar los gráficos. De este modo, el usuario puede ver solo los datos relevantes según los filtros aplicados.

10. Visualización de la aplicación actualizada al usuario: la aplicación Dash muestra los gráficos actualizados al usuario, proporcionando una visión interactiva y personalizada de los datos.

11. Solicitud de análisis de regresión lineal por parte del usuario: el usuario solicita un análisis de regresión lineal sobre los datos filtrados. Este paso inicia el proceso de modelado para comprender las relaciones entre las variables.

12. Envío de datos filtrados para la regresión: la aplicación Dash envía los datos filtrados al modelo de regresión lineal para su análisis.

13. Realización del análisis de regresión lineal: el modelo de regresión lineal analiza los datos proporcionados, calcula la relación entre las variables y genera resultados como la pendiente de la regresión.

14. Envío de los resultados de la regresión a la API de Google Sheets: Los resultados del análisis de regresión, como la pendiente, se envían a la API de Google Sheets para su almacenamiento. Esto permite que los resultados del análisis sean persistentes.

15. Notificación de actualización de datos y solicitud de nuevos datos para el gráfico: una vez almacenados los resultados, la aplicación Dash recibe una notificación y solicita los datos actualizados para

generar un nuevo gráfico que incluya los resultados de la regresión.

16. Suministro de datos actualizados por la API de Google Sheets: La API de Google Sheets proporciona los datos actualizados, incluidos los resultados de la regresión, a las operaciones DataFrame.

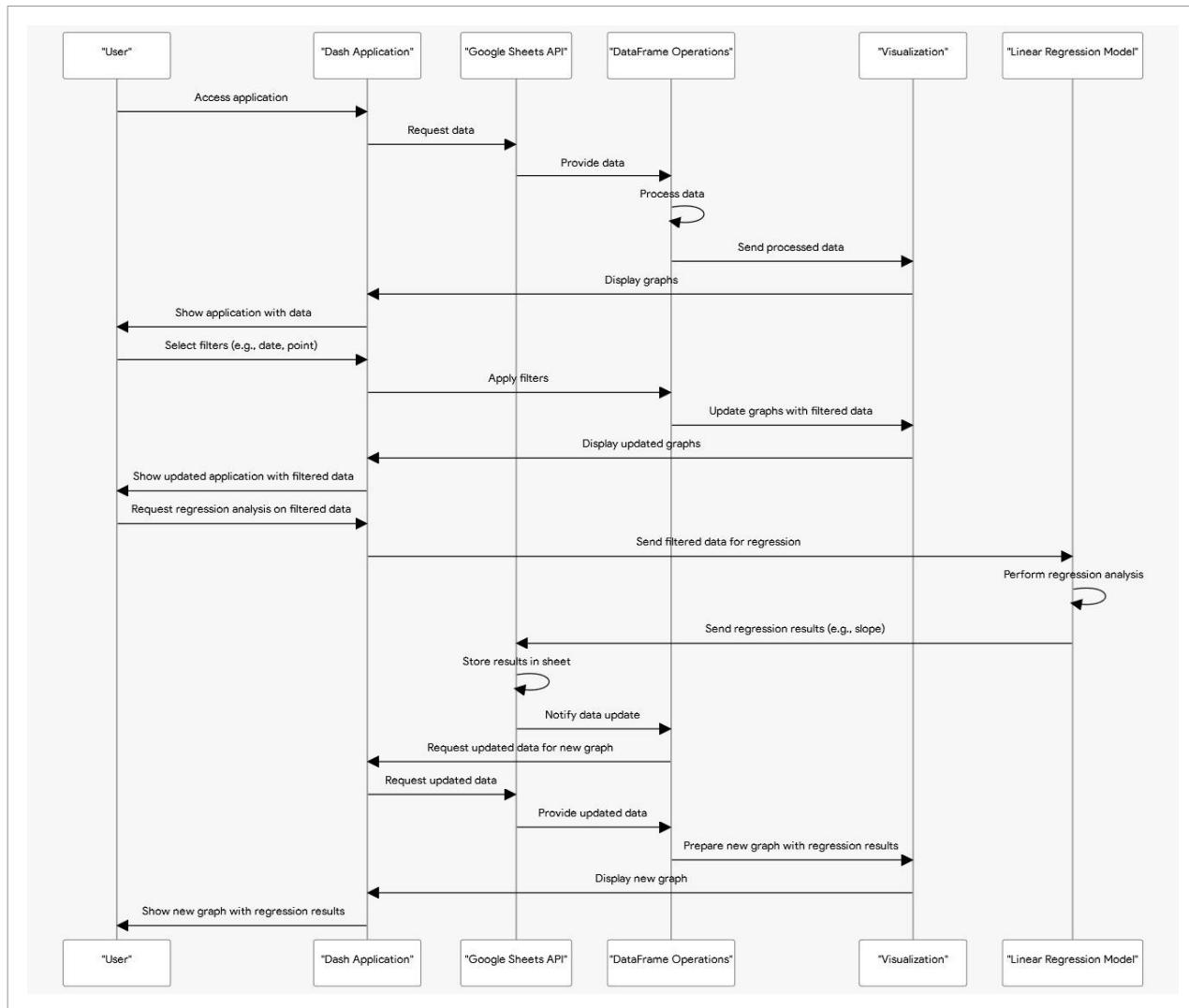
17. Preparación de un nuevo gráfico con los resultados de la regresión: los datos actualizados se procesan y utilizan para preparar un nuevo gráfico que muestre dichos resultados.

18. Finalmente, la aplicación Dash muestra el nuevo gráfico al usuario, completando el ciclo de interacción. Este gráfico incluye los resultados del análisis de regresión y permite al usuario visualizar la relación entre las variables seleccionadas.

Para realizar el despliegue, es necesario alojar el proyecto en un servidor remoto que sea capaz de mantenerlo en ejecución de forma continua. Además, es necesario encontrar la mejor configuración posible, por lo que se ha elegido un Paas como Render para la tarea.

Render ofrece una configuración avanzada para almacenar variables de entorno de forma segura y permitir que el código acceda a ellas en tiempo de ejecución sin exponer información delicada en el repositorio de código o en el control de versiones. En este caso, se ha añadido la clave JSON codificada en base64 para Google Sheets, por lo que el dominio resultante para la aplicación web es meterc02.onrender.com.

Figura 6. Diagrama de secuencia para la aplicación web del sistema

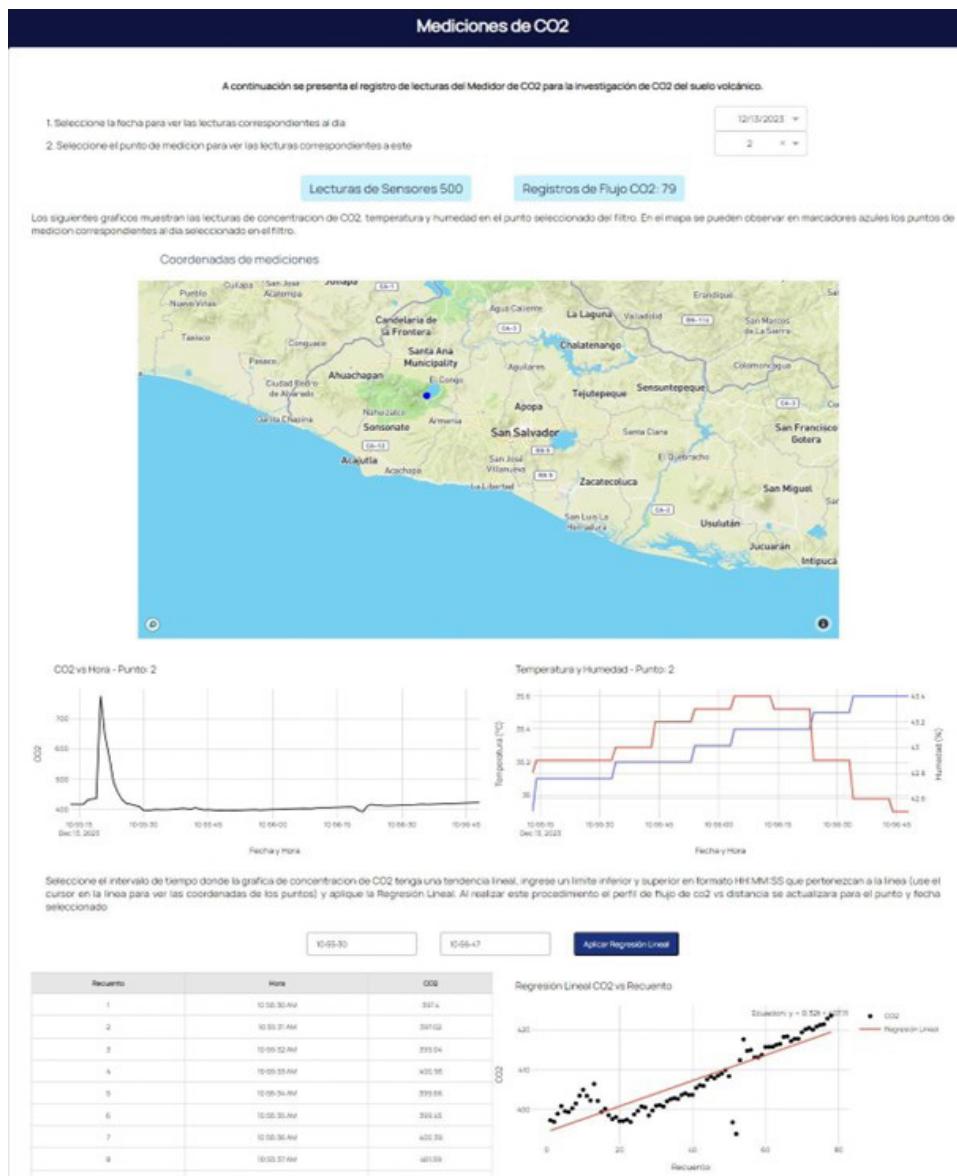


Nota. Secuencia de funciones para el diseño de la aplicación de visualización web del sistema propuesto. Fuente: elaboración propia. Elaboración propia.

Resultados

Para comprobar el funcionamiento del equipo, se efectuaron diferentes pruebas a lo largo del proyecto, con el fin de probar cada nueva funcionalidad implementada. En primer lugar, se reprodujo el sistema inicial cambiando el microcontrolador; luego, se incluyó conectividad GPRS para el envío de datos en tiempo real, y por último, se hicieron pruebas con paquetes de datos. Finalmente, se corroboró el funcionamiento del sitio web para la visualización de datos y para crear un histórico de las mediciones, como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Sitio web de monitoreo del sistema implementado



Nota. Captura de pantalla del sitio web de supervisión del sistema IoT implantado. Fuente: elaboración propia.

Durante el periodo en el que se llevaron a cabo las mejoras a la estación móvil, se efectuaron pruebas en diferentes localidades, siendo la más frecuente «El Cerro Pacho», ubicado al suroeste del lago Coatepeque, en el departamento de Santa Ana. La vereda comparte jurisdicción entre los municipios de El Congo y Santa Ana, y se encuentra a $13^{\circ}50'24.7''N$ y $89^{\circ}34'52.2''O$, a una elevación que oscila entre 826 y 942 msnm, y a una distancia de 2,5 km. Cuando se llevó a cabo la recogida de datos, el entorno se caracterizaba por un día soleado y tiempo seco, como se puede observar en la figura 8.

Figura 8. Prueba en campo del sistema implementado



Nota. Se ve a un operario cargando la maleza con el sensor y la estación diseñada mientras realiza la medición utilizando la campana de concentración del suelo. Fuente: elaboración propia.

Con los datos del ensayo de campo almacenados en la plataforma, también es posible efectuar análisis manuales como el siguiente, que muestra un mapa de calor según el flujo obtenido en las diferentes coordenadas de los puntos. Este mapa se ha realizado en Python utilizando la herramienta Folium para observar mapas (Korstanje, 2022). Estos datos están correlacionados con las medidas de potencial espontáneo y la temperatura de la zona.

Discusión

La elección del ESP32 como microcontrolador para la CPU supone un avance significativo debido a su mayor potencia de procesamiento, mayor capacidad de memoria y eficiencia energética. Este microcontrolador no solo facilita la programación a través de Arduino, que es la base inicial crucial para el proyecto, sino que también soporta diversos lenguajes de programación, lo que amplía las posibilidades de desarrollo futuro e integración con otros sistemas IoT, y elimina la necesidad de usar el módulo HC-06, ya que este dificultaba la escritura de líneas de depuración al interrumpir los mensajes enviados por Bluetooth cuando estaba conectado a los puertos en serie de Arduino.

La elección de la placa TTGO T-Call SIM800L es una decisión estratégica, ya que incluye un módulo GSM integrado que elimina la necesidad de componentes adicionales para la conectividad celular. Este diseño, enfocado a proyectos de internet de las cosas en entornos sin acceso wifi, permite una recogida y transmisión de datos más eficiente, optimizando el sistema para aplicaciones de campo.

La implementación de un sistema de almacenamiento en búfer y reenvío de paquetes de datos permite abordar los desafíos planteados por la rápida generación de datos de CO₂ y la inestabilidad de la conexión GPRS en áreas remotas. Este enfoque mejora significativamente la fiabilidad de la transmisión de datos, ya que garantiza que la información se envía completa y de forma eficiente.

La decisión de utilizar solicitudes HTTP POST para enviar datos a Google Sheets resuelve eficazmente las limitaciones de las solicitudes HTTP GET, que requerían envíos individuales para cada fila de datos, lo que provocaba procesos lentos y posibles pérdidas de datos. Las peticiones POST permiten una transmisión más rápida y fiable de grandes volúmenes, como en este caso, en el que se envía un JSON de hasta 300 objetos.

La optimización de la comunicación Bluetooth en la aplicación móvil mejora la interacción con la CPU, ya que permite pausar y reanudar la recepción de datos para nuevas mediciones sin necesidad de cerrar la aplicación.

Esta mejora contribuye a una mayor eficiencia en el proceso de medición y a una mejor experiencia de usuario.

El desarrollo de una página web personalizada para el análisis y la visualización de datos permite realizar cálculos complejos y presentar la información de forma intuitiva. Esta herramienta se convierte en un componente esencial para la interpretación de los datos recogidos, ya que ofrece a investigadores y usuarios una potente plataforma para el análisis de las emisiones de CO₂. El cálculo de la regresión lineal en la página web es más preciso que en la aplicación, ya que la manipulación de la visualización del gráfico permite realizar cálculos más precisos.

La selección de Render como plataforma para el despliegue de la aplicación web facilita la obtención de un dominio libre y proporciona un entorno robusto para el funcionamiento de la página web. Esta decisión subraya la importancia de contar con una infraestructura de soporte accesible y fiable para difundir los resultados del proyecto.

Conclusiones

La comparación de los cálculos automáticos del flujo de CO₂ realizados por la aplicación y la página web con los realizados manualmente confirma la precisión y fiabilidad de las herramientas desarrolladas. Este nivel de validación es fundamental para garantizar la confianza en los resultados obtenidos y para destacar la precisión del sistema de medición.

Cada una de estas ampliaciones detalla los logros y decisiones clave del proyecto, y destaca el impacto positivo en la medición y el análisis del flujo de CO₂ en suelos volcánicos, reflejando el compromiso con la innovación y la mejora continua en la investigación medioambiental y volcánica.

Una mejora importante para el sitio web sería un nivel aún mayor de automatización, que descartara el uso manual de la selección de intervalos en la zona de comportamiento

lineal del gráfico. Además, sería conveniente que se mostraran automáticamente mapas de calor en función de los datos filtrados.

En la aplicación móvil, la interfaz también podría mostrar un mapa con las coordenadas donde se encuentra el dispositivo con nuevas actualizaciones.

Referencias

- Atif, M., Muralidharan, S., Ko, H. y Yoo, B. (octubre, 2020). Wi-ESP - A tool for CSI-based device-free Wi-Fi sensing (DFWS). *Journal of Computational Design and Engineering*, 7(5), 644-656. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa048>
- Beijing Laikoo Biotechnology. (11 de diciembre de 2024). *Sistema portátil de medición de flujo de CO₂/H₂O en suelo LI-870*. <https://www.bio-equip.com/show1equip5036965.html>
- Burch, M. y Schmid, M. (25 de mayo de 2024). *Dashboard design*. <https://doi.org/10.1201/9781032657301>
- Component 101. (30 de septiembre de 2021). *SIM800L GSM Module*. <https://components101.com/wireless/sim800l-gsm-module-pinout-datasheet-equivalent-circuit-specs>
- DataScientest. (2024). ¿Qué es un DataFrame? <https://datascientest.com/es/que-es-un-dataframe>
- Google Cloud. (02 de diciembre del 2024). *Descripción general de las cuentas de servicio*. <https://cloud.google.com/iam/docs/service-account-overview?hl=es-419>
- Google Workspace. (2023). *Automatiza y extiende Google Workspace con código sencillo*. <https://developers.google.com/apps-script?hl=es-419>
- Huanca Chávez, J. y Choque Choque, D. (2022). *Sistema de geolocalización con alarma y monitoreo basado en IOT para personas con Alzheimer*. *Journal Boliviano de Ciencias*, 18(53). 48-63. <https://doi.org/10.52428/20758944.v18i53.373>
- Jimmy Yang, T.-H., Chambefort, I., Rowe, M., Mazot, A., Seward, A., Werner, C., Fischer, T., Seastres, J., Siega, F., Macdonald, N. y Brakering, T., Coup, L. y Sander, F. (junio, 2024). *Variability in surface CO₂ flux: Implication for monitoring surface emission from geothermal fields*. *Geothermics*, 120, 102981. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.102981>
- Korstanje, J. (2022). *Machine learning on geographical data using Python: Introduction into geodata with Applications and use cases*. https://reconshell.com/wp-content/uploads/2022/09/Machine_Learning_on_Geographical_Data_Using_Python.pdf
- LI-COR. (2024). *Carbon dioxide gas measurements with the LI-830 and LI-850*. <https://www.licor.com/env/products/gas-analysis/LI-830-LI-850>
- Milner, G. (2016). *What is GPS?* *Journal of Technology in Human Services*, 34(1). <https://doi.org/10.1080/15228835.2016.1140110>
- Orellana, R. (21 de abril del 2021). *La evolución de Android: Los cambios del sistema operativo de Google*. Digitaltrends ES. <https://es.digitaltrends.com/android/evolucion-de-android>
- Pérez-Zárate, D., Santoyo, E., Jácome-Paz, M. P., Guevara, M., Guerrero, F., Yáñez-Dávila, D. y Santos-Raga, G. (mayo, 2024). *Soil CO₂ fluxes measured in the Acoculco Geothermal System, Mexico: Baseline emissions from a long-term prospection programme*. *Geochemistry*, 84(2). <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2024.126151>
- Pocasangre, C. O., Flores-Cortez, O. O., Arévalo, F., Arriaza, C., Aguilar, O. y Miranda, B. H. (2023). *An IoT Mobile System for CO₂ Monitoring in Volcanic Soil using the LI-830 Sensor and an Android App*. *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, 1, 1–8. [10.1109/SmartNets58706.2023.10215961](https://doi.org/10.1109/SmartNets58706.2023.10215961)
- Salazar, M. (28 de marzo de 2023). *Termohigrómetros: Una guía completa para elegir y utilizar el instrumento adecuado*. Sodeintec. <https://sodeintecsas.com/termohigrometros-una-guia-completa-para-elegir-y-utilizar-el-instrumento-adecuado/>
- Viswanatha, V., Ramachandra, A. C., Sathisha, B. M., Kumbhari P A., Reddy R, V. S. y Murthy R, S. (2022). *Custom Hardware and Software Integration: Bluetooth Based Wireless Thermal Printer for Restaurant and Hospital Management*. Trabajo presentado en la conferencia MysuruCon 2022 - 2022 IEEE 2nd Mysore Sub Section International Conference. <https://doi.org/10.1109/MysuruCon55714.2022.9972714>