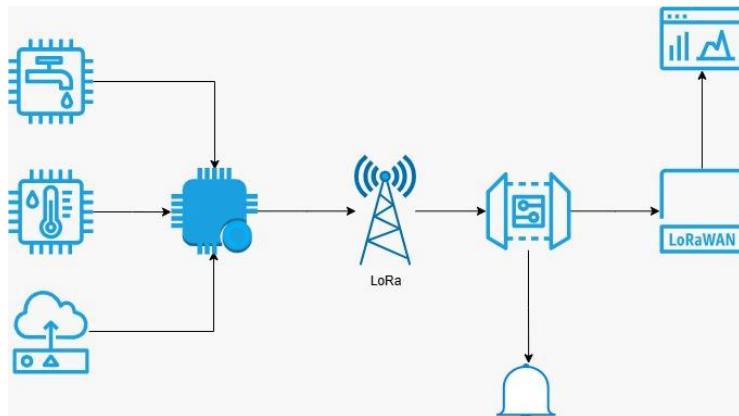


SISTEMA DE DETECCIÓN

Se propone una solución integral de resiliencia ante inundaciones que combina tecnología IoT, ingeniería natural y acción local. El sistema utiliza una red de sensores LoRa alimentados por energía solar, capaces de monitorear en tiempo real variables hidrológicas críticas: precipitación (pluviómetro), nivel del agua (sensor ultrasónico), humedad ambiental y sedimentación en puntos estratégicos del cauce.



Arquitectura del sistema

Los sensores se instalarán en puntos clave de la vereda La Esmeralda para registrar continuamente el comportamiento del río y del entorno. La información recolectada se transmite mediante comunicación LoRa 915 MHz hacia un gateway central, que procesa los datos y los envía a un dashboard en la nube (ver figura 1), permitiendo a las instituciones un seguimiento remoto y registro histórico de las condiciones del río.

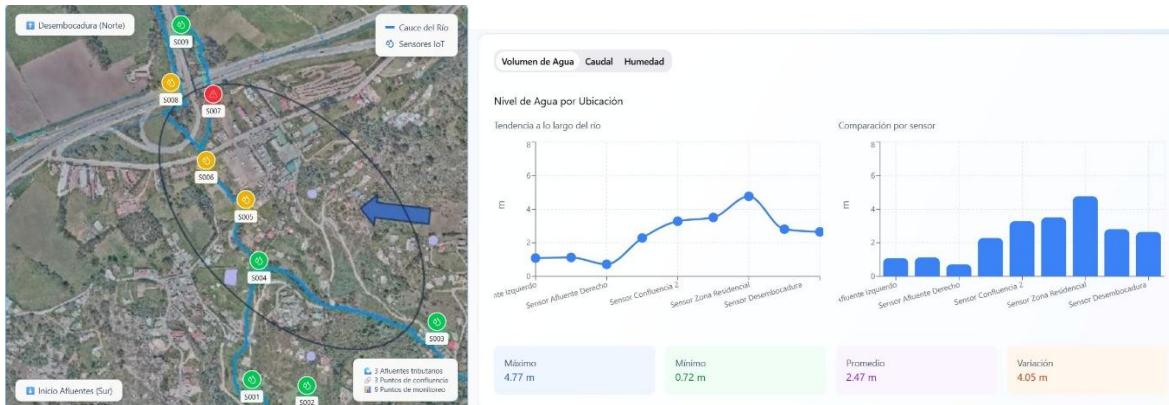


Figura 1. Dashboard en la nube

Cuando se detecten condiciones de riesgo, como lluvias intensas, incremento rápido del nivel del agua o aumento de sedimentos, el sistema activará de forma automática alertas locales (luces y sirenas comunitarias) y enviará notificaciones por SMS a las autoridades competentes. De esta manera, la comunidad cuenta con una advertencia inmediata, incluso sin conexión a internet, y las entidades pueden coordinar una respuesta oportuna.

Adicionalmente, los datos recopilados alimentan un modelo predictivo de probabilidad de inundación (figura 2), actualmente entrenado con variables históricas de la ciudad de Medellín. Una vez los sensores estén operativos en la vereda, el modelo podrá actualizarse con los datos reales del territorio, mejorando la precisión de las predicciones y fortaleciendo la toma de decisiones anticipadas.



Figura 2. Modelo de predicción

Implementación tecnología IOT

El sistema IoT está diseñado para funcionar sin dependencia de internet, utilizando dos tipos de redes complementarias:

- una red local LoRa, basada únicamente en comunicación por radiofrecuencia,
- y una red 4G, ubicada en el punto de mayor cobertura que es la escuela de la vereda, destinada a la conectividad con la nube.

Los sensores inteligentes, ubicados en puntos críticos de la quebrada, miden, procesan y generan alertas de forma autónoma. Cada nodo transmite sus datos mediante radiofrecuencia LoRa, comunicándose directamente con el gateway o, si no hay conexión directa, reenviando la información entre nodos hasta alcanzar el destino, sin requerir acceso a internet.

La red LoRa 915 MHz proporciona cobertura de varios kilómetros, ideal para zonas rurales con señal celular limitada. Esto garantiza una comunicación estable y confiable entre los sensores, las alarmas comunitarias y el gateway, manteniendo la operatividad del sistema incluso en condiciones adversas.

El gateway, ubicado en la escuela de la vereda (según el mapa de calor de cobertura 4G en la figura 3), integra un módulo SIM7600G LTE que le permite transmitir los datos recopilados a la nube y enviar notificaciones automáticas por SMS a las autoridades a través de la plataforma Ubidots. De esta manera, se implementa una arquitectura híbrida: las alertas locales se activan sin depender de internet, mientras que la transmisión remota se realiza únicamente cuando hay conectividad disponible, garantizando resiliencia y continuidad operativa del sistema.

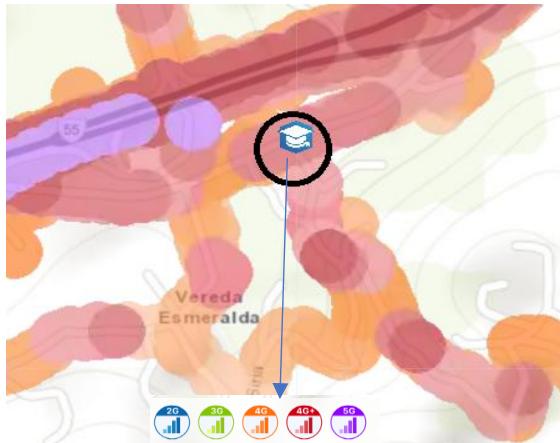


Figura 3. Mapa de calor de conexión

Sacado de Cobertura 3G / 4G / 5G - Colombia - nPerf.com

Componentes y tecnologías empleadas

- Nodos sensores (3 unidades)
 - o Microcontrolador: TTGO T-Beam (ESP32 + LoRa SX1276 + GPS + batería 18650).
 - o Sensores integrados: Pluviómetro de balancín: mide la intensidad y volumen de lluvia acumulada.
 - o Sensor ultrasónico JSN-SR04T IP67: determina el nivel del agua en el cauce.
 - o Sensor de turbidez óptico SEN0189: cuantifica la concentración de sedimentos o sólidos suspendidos, indicando riesgo de obstrucción por material de arrastre.
 - o Sensor de temperatura/humedad DHT22 o SHT31: complementa las variables meteorológicas locales.
- Procesamiento local: cada nodo compara las mediciones con umbrales predefinidos
- Comunicación: red LoRa 915 MHz punto a punto hacia el gateway.
- Energía: panel solar 20 W + controlador solar 10 A + batería 18650 / 12 V 7 Ah.
- Protección ambiental: caja IP65 con prensaestopas y montaje en PVC para exteriores.

Gateway (punto de conectividad)

- Ubicación sugerida: Escuela de la vereda La Esmeralda (zona con mejor cobertura 4G).

- Hardware: TTGO T-Beam ESP32 + módulo SIM7600G-H LTE + antenas LoRa y 4G + caja IP65.
- Funciones: Recibir datos y alertas de los tres sensores por LoRa. Procesar umbrales locales y, ante una alerta roja, reenviar la información a la nube (Ubidots) mediante conexión 4G. Enviar mensajes SMS automáticos a autoridades o líderes comunitarios cuando se supera un nivel crítico. Energía: corriente 12 V o panel solar 20 W.

Nodos de alarma (2 unidades)

- Microcontrolador: Heltec WiFi LoRa 32 V3 o ESP32 + LoRa RA-02.
- Actuadores: relé 5 V, sirena 12 V (100 dB) y baliza LED IP65 para alerta visual.
- Comunicación: recepción LoRa 915 MHz de mensajes enviados por los sensores o el gateway (“ALERTA: AMARILLA”, “ALERTA: ROJA”).
- Autonomía: batería 12 V 7 Ah + panel solar 10 W.
- Función: activar luz y sonido ante alertas, sin depender de conexión a internet, garantizando aviso inmediato a la comunidad.

Herramientas y software utilizados

Herramienta / plataforma	Función
Arduino IDE / PlatformIO	Programación de nodos, gateway y dispositivos de alarma.
Processing IDE	Simulación y validación de la lógica de umbrales y alertas. (figura 3)
Ubidots Cloud	Envío de mensajes SMS automáticos y almacenamiento temporal de datos en la nube.
MQTT / HTTP API Ubidots	Comunicación eficiente entre el gateway 4G y la plataforma en la nube.



Figura 3. Secuencia de funcionamiento del simulador, que muestra la transición desde la alerta amarilla por lluvia hasta la alerta roja por aumento de sedimentos y nivel del agua, activando la alarma y representando el estado de inundación.

Umbrales definidos

De acuerdo con los datos suministrados por la comunidad y el análisis hidrológico, el cuello de botella de la quebrada presenta una capacidad máxima de $2,92 \text{ m}^3/\text{s}$.

A partir de este valor se definen los umbrales de caudal (Q) para establecer los diferentes niveles de alerta, considerando el comportamiento observado del flujo en

condiciones normales y extremas, así como la influencia de residuos y sedimentos en la sección crítica.

Nivel de alerta	Rango de caudal (m ³ /s)	Porcentaje de capacidad	Descripción de la condición
Verde (Vigilancia)	Q < 1,7 – 1,8	< 60 %	Caudal dentro del comportamiento normal del cauce. Se mantiene monitoreo continuo; no se requiere acción comunitaria.
Amarillo (Preparación)	1,8 – 2,3	60 % – 80 %	Incremento progresivo del caudal. Se notifica a líderes comunitarios para preparación preventiva.
Naranja (Peligro / Prealerta)	2,3 – 2,9	80 % – 95 %	Flujo cercano a la capacidad máxima del cuello de botella. Existe riesgo de taponamiento por residuos o sedimentos. Se activan alertas luminosas en la vereda.
Rojo Desbordamiento probable	≥ 2,9 o aumento repentino (> 0,5 m en 10 min)	≥ 95 % – 100 %	Caudal crítico o tendencia rápida de crecida. Se considera inminente el desbordamiento. Se activan sirenas y protocolo de evacuación.

Estimación de costos de la solución IoT de alerta temprana

Componente	Cantidad	Precio unitario (COP)	Subtotal (COP)	Fuente / referencia
TTGO T-Beam ESP32 + LoRa 915 MHz	4 (3 nodos + 1 gateway)	220.000	880.000	MercadoLibre: TTGO T-Beam V1.2 ESP32 LoRa 915 MHz
Sensor ultrasónico JSN-SR04T IP67	3	40.000	120.000	Sigma Electrónica: JSN-SR04T
Sensor de humedad y temperatura (DHT22 / SHT31)	3	30.000	90.000	Promedio MercadoLibre / AliExpress
Pluviómetro de balancín (tipping bucket)	3	100.000	300.000	Promedio MercadoLibre / AliExpress
Sensor de turbidez óptico IR (SEN0189 o similar)	3	110.000	330.000	DFRobot / AliExpress / MercadoLibre
Panel solar 20 W 12 V	3	103.000	309.000	Ferretrónica
Controlador solar 10 A 12 V	3	60.000	180.000	Didácticas Electrónicas
Batería 18650 / 12 V 7 Ah	3	35.000	105.000	Promedio MercadoLibre
Caja IP65 + prensaestopas + montaje PVC	3	55.000	165.000	Ferretrónica / estimado
Misceláneos (cables, conectores, soportes)	3	40.000	120.000	Estimado local
Gateway (módulo SIM7600G 4G LTE + antenas + caja)	1	520.000	520.000	Didácticas Electrónicas + MercadoLibre
Nodos de alarma (LoRa + sirena + baliza + batería)	2	625.000	1.250.000	Fervicom LED + MercadoLibre
Tarjeta SIM 4G (datos y SMS mensuales)	1	60.000	60.000	Operadores Móviles
Instalación y montaje (tubería, tornillería, concreto, transporte)	1	300.000	300.000	Estimado de campo
Total estimado del sistema IoT			4.729.000 COP	

SISTEMA DE PREVENCIÓN

Enfoque general

Nuestro plan de prevención busca disminuir el impacto de las inundaciones en la quebrada La Esmeralda, aprovechando los recursos naturales y humanos disponibles en la comunidad, mediante el uso de soluciones de bajo costo, sostenibles y fáciles de mantener.

El proyecto combina tecnología IoT con acciones basadas en la naturaleza, priorizando la identificación de zonas críticas, el control del buchón de agua, la construcción de pequeñas estructuras de retención (“check-dams”) y la revegetación con especies nativas.

Identificación de puntos críticos

En primera instancia, se implementará un sistema de sensores que permitirá identificar los puntos más críticos del cauce, es decir, los lugares donde el agua se desborda, donde se generan remolinos o donde las orillas presentan desmoronamientos.

A partir de esta información, se definirán los sitios prioritarios de intervención, concentrando allí las acciones principales de control y restauración.

Control del buchón de agua

Dado que la extracción total y mecanizada del buchón a lo largo de los 2 km del cauce implicaría un alto costo, se optará por un control focalizado y preventivo mediante método manual intensivo.

La estrategia consiste en destinar aproximadamente \$4.400.000 COP para contratar entre 50 y 60 jornales de mano de obra local, orientados a ejecutar una jornada de choque para retirar el buchón de los puntos críticos, especialmente puentes y represamientos, evitando taponamientos y contenido su expansión.

El millón y medio de pesos restante del presupuesto asignado a esta fase se empleará en el alquiler de una volqueta por horas y la logística general de la operación.

Es fundamental coordinar con la CAR Cundinamarca el sitio autorizado para el acopio temporal de la biomasa extraída, que posteriormente se destinará a procesos de compostaje, promoviendo un modelo de economía circular.

De esta manera, el material vegetal retirado se transformará en abono orgánico para los proyectos de revegetación o agricultura local.

Construcción de barreras naturales (Check-Dams)

Posteriormente, se implementará la construcción de pequeñas barreras naturales o “check-dams”, elaboradas con piedras, troncos y ramas locales.

Estas estructuras se instalarán en serie dentro del cauce, en los tramos de mayor pendiente o velocidad del flujo, y servirán para ralentizar la corriente del agua, permitir la infiltración en el suelo y retener los sedimentos que descienden desde la parte alta.

Los check-dams, también denominados presas filtrantes, tendrán una altura entre 40 y 80 cm y se ubicarán únicamente en los sectores más inclinados o erosionados, evitando intervenir zonas estables.

Su función principal es reducir la fuerza del agua antes de que llegue a la zona poblada, contribuyendo a disminuir el riesgo de inundación sin alterar significativamente el cauce natural.

El costo de implementación recae principalmente en la mano de obra, ya que los materiales se obtendrán directamente del entorno.

Para esta primera fase, se construirá un piloto con 10 estructuras en la parte alta del cauce, donde el arrastre de sedimentos provenientes del área minera es mayor.

El objetivo del piloto es evaluar la efectividad de las estructuras en la reducción de la velocidad del flujo y la retención de sedimentos antes de su aplicación a gran escala.

Con el uso de materiales locales y mano de obra no especializada, el costo estimado para esta fase es de \$3.400.000 COP, que cubre aproximadamente 40 jornales (días-hombre), la supervisión técnica inicial y la logística básica. Se considera un pago promedio de \$85.000 por día, incluyendo la afiliación mínima a ARL.

Revegetación con especies nativas

Sobre las áreas intervenidas se llevará a cabo una revegetación con especies nativas, con el fin de crear una franja vegetal protectora que ayude a fijar el suelo, absorber el exceso de agua y reducir la erosión. Esta revegetación se plantea en tres franjas diferenciadas, de acuerdo con la distancia al cauce y el nivel de humedad del terreno, replicando la estructura natural de un corredor ripario y promoviendo la recuperación de la biodiversidad.

- Primera franja (zona más cercana al cauce): se utilizarán herbáceas y pastos resistentes a la humedad, como *Paspalum vaginatum*, que ayuda a sujetar el suelo y filtrar sedimentos.
- Segunda franja (zona húmeda pero no saturada): incluirá arbustos nativos medianos, como *Duranta mutisii*, que estabiliza el terreno y ofrece refugio a la fauna.
- Tercera franja (zona alta o seca): se sembrarán árboles nativos de raíces profundas, como el Sauce (*Salix humboldtiana*), que fortalecen la estructura del suelo y proveen sombra.

Previo a la ejecución, se realizará una consulta formal con la CAR Cundinamarca para definir las especies permitidas y obligatorias, asegurando el cumplimiento de la normativa ambiental vigente.

Costo y alcance del plan de revegetación

El plan de revegetación tiene un costo estimado de \$5.600.000 COP, enfocado en los 350 metros lineales más críticos del cauce (equivalentes al 17,5 % de los 2 km totales). Este

enfoque busca maximizar el impacto con los recursos disponibles, priorizando las zonas de mayor vulnerabilidad.

El presupuesto se divide en dos componentes:

- Mano de obra y logística: \$1.195.250 COP (11 jornales + herramientas básicas).
- Material vegetal: \$4.404.750 COP, destinados a la compra de 1.407 plántulas, distribuidas equitativamente en las tres franjas (469 por franja).

Esta intervención permitirá establecer una estructura riparia funcional, reforzando el control de erosión y cumpliendo con los estándares técnicos sin superar el presupuesto asignado.

Aplicación estratégica por secciones

Finalmente, se decidió combinar las técnicas de manera estratégica por tramos, aplicando solo las soluciones más adecuadas según el tipo de problema presente. En los sectores con pendiente pronunciada o erosión del fondo, se implementarán check-dams de piedra o troncos; mientras que en las zonas más planas o de corriente baja, se optará únicamente por la revegetación. Esta planificación por secciones garantiza eficiencia, sostenibilidad y coherencia ecológica, reduciendo costos sin sacrificar el impacto ambiental ni la funcionalidad del sistema.

El mantenimiento del sistema se basa en un modelo de corresponsabilidad entre la Cruz Roja, la Alcaldía de Tocancipá y la comunidad local.

Se realizarán revisiones cada dos meses, limpiezas después de las temporadas de lluvia y un mantenimiento general anual con apoyo institucional. La comunidad, mediante un comité local capacitado, realizará las tareas básicas guiadas por un sistema de semáforo visual (verde: bien, amarillo: limpiar, rojo: reportar).

Los sensores IoT también apoyarán la planificación del mantenimiento, al detectar acumulación de sedimentos o cambios en el flujo. Este esquema garantiza un cuidado sencillo, participativo y sostenible, permitiendo que el sistema funcione eficazmente a largo plazo.

Referencias

- [1] N. M. Yoeseph, F. A. Purnomo, R. Hartono y Nuryani, “LoRa-based IoT sensor node for Real-time Flood Early Warning System”, *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*, vol. 986, p. 012060, 2022.
- [2] A. Rose, D. Wei, J. Machado y K. Spencer, “Benefit–Cost Analysis of Low-Cost Flood Inundation Sensors”, *Sustainability Solutions*, 2022
- [3] Y.-C. Lin y H.-C. Ho, “Hydrological Measurement for Mountain Creeks with IoT Technique”, *4th International Symposium on Hydraulic Structures*, Taipei City, Taiwan, 2024.
- [4] M. Siddique, T. Ahmed y M. S. Husain, “Flood Monitoring and Early Warning Systems – An IoT Based Perspective”, *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, vol. 9, no. 2, e4, 2023.
- [5] “Evaluation of LoRa Technology in Flooding Prevention Scenarios”, *Sensors*, 2020.
- [6] F. I. Contreras, “Spatio-temporal variability monitoring of the floods in the center-west of the Buenos Aires Province (Argentina) using remote sensing techniques,” *Repositorio institucional CONICET*, 2021