

Proceso operativo detallado para el Sistema de Alerta Temprana (SAT) — Adquisición, transmisión y acción

Propuesto por 404NotFound (Sleep)

1 de noviembre de 2025

Resumen

Este documento describe paso a paso el flujo operativo del Sistema de Alerta Temprana (SAT) propuesto: adquisición periódica de datos por sensores (ultrasónico y pluviómetro tipo cubeta basculante), procesamiento local en cada nodo (ESP32), transmisión por LoRa al gateway (Raspberry Pi), decisión de alerta en el edge, notificación vía SMS por GSM y activación de actuadores (sirena) cuando se supera el umbral de inundación. Se incluyen detalles técnicos de señales, muestreo, tratamiento de datos, protocolos de comunicación, lógica de umbrales y medidas de robustez y seguridad. Al final se presenta el presupuesto ajustado con la cantidad de nodos .

1. Arquitectura general (resumen)

El SAT tiene la siguiente secuencia funcional:

1. **Adquisición:** sensores miden variables cada 30 s.
 - *Sensor de nivel (ultrasónico):* mide distancia al espejo de agua (salida 4–20 mA o digital) cada 30 s.
 - *Pluviómetro (tipping bucket BGT):* cuenta pulsos (cada tip = mm definido) y se consulta cada 30 s para obtener incremento.
2. **Nodo local (ESP32 LoRa):** lee sensores, aplica filtrado y calcula variables derivadas (lluvia/h y nivel absoluto), empaqueta los datos y transmite por LoRa.
3. **Red de radio (LoRa):** paquetes de telemetría viajan hacia el gateway (antena/concentrador).
4. **Gateway / Edge (Raspberry Pi):** recibe paquetes, valida datos, aplica lógica de umbrales y persistencia (por ejemplo, umbral sostenido X minutos), registra eventos y decide acciones.
5. **Notificación:** si se cumple condición de alerta, la Pi envía SMS vía el módulo GSM (SIM800 / AT commands) a listas predefinidas.

6. **Actuación local:** la Pi (o el gateway) activa un relé/driver para semáforo (rojo/amarillo/verde) y/o una sirena si la alerta es crítica.
7. **Registro y post-mortem:** todos los eventos quedan logueados (historical log) para calibración y auditoría.

2. Detalles de adquisición y muestreo

2.1. Frecuencia de muestreo

- **Intervalo de lectura: 30 segundos.** Elección motivada por equilibrio entre detección temprana y consumo energético. Permite detectar tendencias rápidas sin generar tráfico excesivo.
- Además de la lectura cada 30 s, cada nodo mantiene contadores para cálculo de intensidad y evitar ruidos.

2.2. Sensores y señales

Ultrasónico (nivel): monta sobre la orilla en mástil/fijación. Señal típica:

- Salida 4–20 mA (industrial) o UART/RS232/TTL en modelos avanzados. Para interfaz con ESP32 usar un convertidor 4 - 20 mA a voltaje y entrada ADC o leer vía UART si dispone.
- Calibración inicial: medir distancia de referencia (posición del sensor respecto a cota de interés) para convertir distancia medida a nivel de agua absoluto (m).

Pluviómetro (BGT tipping bucket): salida por reed switch / contacto seco que genera un pulso por cada tip (p. ej. 0.2 mm). Interfaz:

- Conectar al GPIO digital del ESP32 con interrupción (edge detection). Contador de pulsos con timestamp.
- Para evitar rebotes (bouncing): implementar debounce hardware (condensador) o software (bouncetime 50 ms).

2.3. Lectura y preprocesado en el nodo (ESP32)

1. **Lectura sensor ultrasónico:** si la salida es analógica, leer ADC y convertir por curva de calibración a metros. Si es serial, parsear y validar CRC.
2. **Lectura pluviómetro:** contar pulsos desde la última lectura. Calcular mm acumulados en el intervalo.
3. **Validación de plausibilidad:** descartar lecturas fuera de rango físico (p. ej. nivel negativo, cambio brusco imposible). Marcar como `invalid` y reportar.
4. **Filtrado:** aplicar filtro median o moving-average corto para atenuar picos por espuma o salpicaduras (ultrasónico).
5. **Cálculos derivados:**

- Intensidad de lluvia (mm/h) = (mm en ventana / minutos ventana) \times 60.

3. Transmisión LoRa — consideraciones

- **Parámetros típicos:** frecuencia (depende del país, e.g. 868/915 MHz), Spreading Factor (SF7–SF12), banda, potencias. Balancear SF para alcance vs latencia.
- **Retransmisiones y ACK:** emplear confirmación opcional (ACK) para paquetes críticos; si no hay ACK reintentar N veces con backoff exponencial. Evitar congestión en uplink (configurar intervalo 30 s y ventanas más largas para redundancia).
- **Seguridad:** usar encriptación a nivel aplicación (AES) y, si se usa LoRaWAN, las llaves apropiadas (NwkSKey, AppSKey).
- **Formato de paquete:** incluir node ID, timestamp, secuencia, checksum y campos comprimidos. Ejemplo binario de 10–20 bytes.

4. Gateway / Edge (Raspberry Pi) — ingestión y lógica de decisión

4.1. Ingestión de datos

- El gateway ejecuta un `packet_forwarder` o un servidor LoRa local (por ejemplo Semtech forwarder, LoRa Server/ChirpStack o un servicio personalizado).
- Se almacena un registro en disco (CSV o base de datos ligera como SQLite) con las lecturas crudas y calculadas.
- La Pi mantiene reloj sincronizado (NTP) para timestamps fiables.

4.2. Validación y saneamiento

- Validar integridad de datos (checksum, secuencia).
- Marcar nodos sin reportes por más de X minutos como “offline” y activar alarma de diagnóstico (no de inundación).
- Aplicar filtros adicionales (detección de outliers por Z-score) y marcar datos sospechosos.

4.3. Lógica de umbrales y persistencia (reglas de alerta)

1. Definición de umbrales: por ejemplo:

- **Alerta preventiva (amarillo):** nivel > 1.0 m o lluvia intensidad > 20 mm/h.
- **Alerta crítica (rojo):** nivel > 1.5 m y persistente 3 lecturas consecutivas (i.e., 90 s), o lluvia acumulada > 50 mm en 1 h.

2. Histeresis y debounce: para evitar oscilaciones, emplear histeresis (por ejemplo, volver a estado normal solo si nivel cae por debajo de umbral - 0.1 m durante 3 lecturas).

3. **Política de persistencia:** ejecutar la alerta solo si la condición se mantiene N veces consecutivas (ej. 3 lecturas / 90 s) o si dos variables independientes indican riesgo (nivel + lluvia).
4. **Escalamiento progresivo:** primero notificar por SMS a líderes y autoridades (amarillo), si persiste, activar semáforo en modo rojo y sirena (rojo).

4.4. Registro y auditoría

- Guardar logs de decisiones (qué lectura provocó la alerta, timestamps, nodos involucrados).
- Mantener histórico para ajuste de umbrales y evaluación post-evento.

5. Notificación SMS vía GSM

- El gateway controla un módulo GSM (SIM800) por puerto serial (UART / USB-serial).
- En caso de activación de alerta, la Pi envía comandos AT para enviar SMS a una lista de contactos preconfigurada (municipio, Bomberos, Cruz Roja, líderes comunales).
- Implementar reintentos y verificación de entrega (cuando posible) con reporte en log.
- Formato de mensaje: identificar emergencia, ubicación, nivel estimado y recomendaciones breves (ej. Alerta roja: creciente en La Esmeralda. Evacuar zona baja. Sirena activada.).

6. Actuación local: sirena

6.1. Hardware de actuación

- **Controlador de salida:** la Raspberry Pi (o un relé controlado por la Pi / controlador auxiliar) acciona relés que alimentan la sirena desde alimentación 12–24 V.

6.2. Secuencia de acción

1. **Alerta preventiva (amarillo):** activar semáforo a amarillo.
2. **Alerta crítica (rojo):** activar semáforo a **rojo**, activar sirena intermitente con patrón definido (por ejemplo, 3 ciclos de 10 s), enviar SMS a toda la lista y marcar evento como emergency.
3. **Desactivación:** se requiere confirmación manual (botón de reinicio por líder) o condición de vuelta a normal comprobada por lógica con histeresis.

7. Medidas de robustez y mantenimiento

- **Test periódico automático:** cada 24 h ejecutar autodiagnóstico (batería, sensor alive, LoRa) y reportar estado.
- **Modo prueba/simulacro:** permitir activar desde gateway un modo simulacro que active semáforo/sirena sin enviar SMS para capacitaciones.
- **Protección física:** cajas IP65, anclajes y protecciones mecánicas.
- **Inventario de repuestos:** sensores y fusibles en stock local para reposición rápida (partida incluida en presupuesto).
- **Capacitación:** registro y manual para líderes (procedimiento de emergencia, reinicios y chequeos).

8. Configuración y parámetros recomendados (resumen técnico)

- **Muestreo nodo:** 30 s.
- **Ventanas de cálculo:** 1 min (intensidad instantánea), 15 min y 60 min (tendencia).
- **Persistencia para alerta crítica:** condición sostenida por al menos 3 lecturas consecutivas (90 s) o combinación nivel mas lluvia.
- **Seguridad datos:** registro encriptado a nivel archivo (opcional), firma simple de paquetes (MAC).
- **Mecanismo de fallback:** si gateway no responde, nodos entran en modo store-and-forward y si hay posibilidad intentar envío directo por módulo GSM local (opcional, no incluido en el presupuesto base).

Explicación detallada del presupuesto

A continuación se presenta la explicación detallada de cada partida presupuestal, indicando el propósito técnico, la función en el sistema y la razón por la cual se considera la cantidad asignada.

A) Hardware por nodo (x5 nodos) — Subtotal por nodo y detalle

Cada nodo está diseñado para operar de forma remota y autónoma, medir variables hidrológicas críticas y transmitir datos al gateway. El subtotal por nodo incluye los siguientes ítems:

- **Sensor de nivel ultrasónico: 385.000 COP a 500.000 COP (por sensor)**
Mide el nivel del agua sin contacto directo, reduciendo mantenimiento y riesgos de corrosión. Se selecciona un modelo con rango hasta 10 m y salida compatible para

lectura por microcontrolador (4–20 mA o señal digital), adecuado para la variabilidad de la quebrada. Su robustez (IP65/IP67) y materiales resistentes justifican el coste.



Figura 1: Sensor ultrasonido opción 1



Figura 2: Sensor ultrasonido opción 2

■ **Pluviómetro tipo cubeta basculante BGT (tipping bucket): 385.000 COP (por sensor)**

Mide la precipitación acumulada con alta resolución (p. ej. 0.2 mm por tip). Proporciona pulsos eléctricos fáciles de contar desde una Raspberry/ESP32 y es la fuente primaria de información para estimar la intensidad de lluvia, dato esencial para predicción de crecientes.



Figura 3: Pluviómetro

- **Módulo TTGO/Heltec LoRa (ESP32 LoRa): 120.000 COP**

Nodo de comunicación que integra lectura de sensores, preprocesado local (filtering, debouncing) y transmisión por LoRa hacia el gateway. Su capacidad de bajo consumo, conectividad y flexibilidad para ejecutar lógica local (edge) lo hace la opción más costo-efectiva.

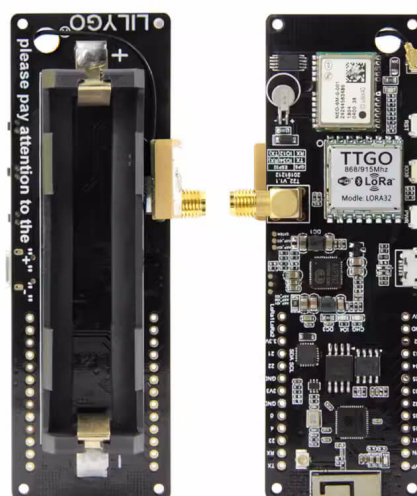


Figura 4: TTGO

- **Panel solar pequeño (6–10 W) + regulador: 70.000 COP**

Fuente de energía para mantener operación autónoma del nodo, dimensionado para cargas típicas de un ESP32 LoRa y sensores con bajo duty cycle. El regulador garantiza carga segura de la batería y protección contra sobrecarga.



Figura 5: Panel solar

- **Batería 12V (SLA pequeñas o LiFePO4): 70.000 COP**
Reserva de energía para operación nocturna y días nublados. Se recomienda LiFe-PO4 por vida útil y seguridad, aunque se puede optar por SLA si la restricción presupuestal es estricta.



Figura 6: Batería

- **Caja estanca IP65 + montaje + cables: 40.000 COP**
Protección física de la electrónica frente a humedad, polvo y fauna; incluye soportes para fijación en mástil o poste, y cableado básico resistente a UV.



Figura 7: Caja IP65

- **Cableado, soportes, protecciones (pararrayos básico): 25.000 COP**

Materiales auxiliares de instalación: canalizaciones, bridas, fusibles, diodos de bloqueo, y una protección básica contra sobretensiones y rayos que reduce riesgo de daño durante tormentas.

Subtotal por nodo (actualizado): 1.095.000 COP.

Total 5 nodos: 5.475.000 COP.

B) Gateway y Edge

- **Concentrador LoRa (iC880A) + HAT: 350.000 COP**

Recibe paquetes LoRa de todos los nodos y actúa como puente entre la red de sensores y la infraestructura de cómputo local. La elección de un concentrador con buena sensibilidad y soporte para packet forwarding reduce pérdidas y mejora la latencia.



Figura 8: LoRa

- **Raspberry Pi 4 (4 GB) + tarjeta SD: 300.000 COP**

Equipo de edge computing para ejecutar el network server local, almacenar regis-

tros, ejecutar la lógica de umbrales y proporcionar interfaz local (dashboard). La Pi permite ejecutar servicios como MQTT, Node-RED, y herramientas de logging con bajo coste.

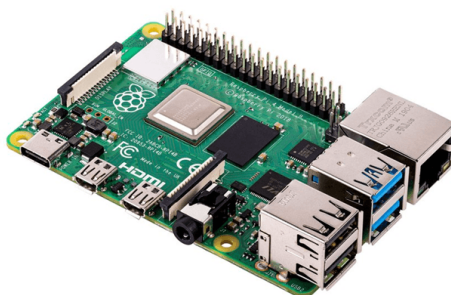


Figura 9: Raspberry Pi 4

- **Módulo GSM (SIM800) + SIM con plan básico: 70.000 COP**
Canal de respaldo para el envío de alertas (SMS) cuando la conexión principal falla; importante para garantizar notificaciones a autoridades y comunidad.



Figura 10: Módulo GSM

Total Gateway: 720.000 COP.

C) Actuadores de alerta (3 emplazamientos)

- **Sirena eléctrica 12–24 V (potente y confiable): 140.000 COP c/u**
Señal sonora de alta intensidad para alertar de forma inmediata a la población local,

incluso en ausencia de cobertura móvil.

- **Soportes e instalación: 30.000 COP c/u**

Materiales y mano de obra menor para fijación segura de sirena y semáforo en puntos estratégicos.

Total por emplazamiento: 170.000 COP.

Total 3 emplazamientos: 510.000 COP.

D) Mano de obra, desarrollo de software, pruebas y capacitación

- **Desarrollo de software edge (ingestión LoRa, lógica de alertas, fallback GSM, logs): 1.800.000 COP**

Ingeniería de software para asegurar que los datos de los nodos sean recibidos, procesados, validados (filtro de ruido y debounce), evaluados contra reglas configurables y que, ante condiciones de riesgo, se emitan notificaciones por GSM y se activen los actuadores locales.

E) Repuestos, herramientas y contingencia (10 %)

- **Repuestos (sensores extra, cables, fusibles, conectores): 400.000 COP**

Inventario mínimo para reemplazo rápido y reducción del tiempo de inactividad en campo.

- **Contingencia 10 % del proyecto: 800.000 COP**

Fondo para cubrir imprevistos: variación de precios, costos de transporte, pequeñas obras civiles, ajustes de montaje o adaptadores eléctricos necesarios.

Total Repuestos + Contingencia: 1.200.000 COP.

Total general

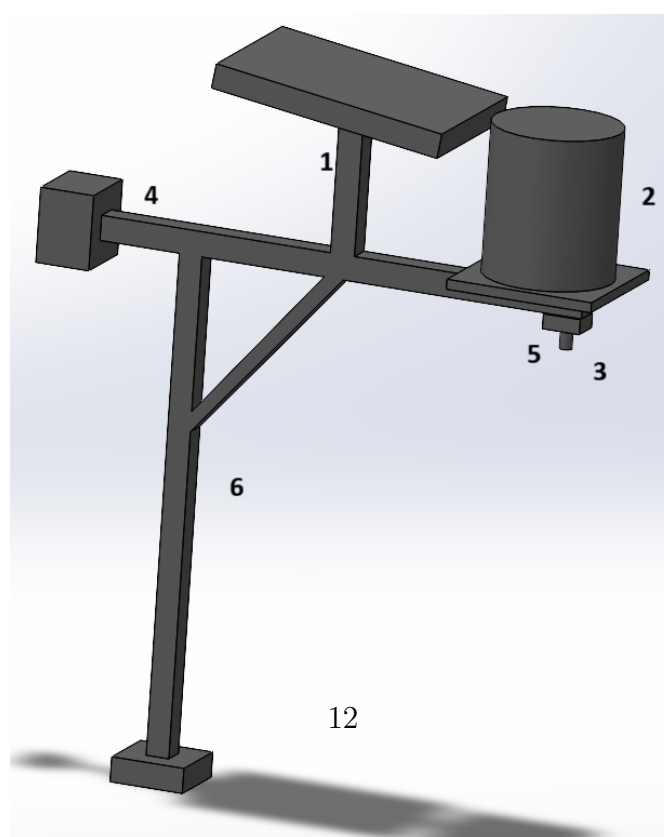
Total proyecto (sumatoria de A–E): 9.705.000 COP.

9. Estructura del nodo hidrometeorológico

La Figura 11 muestra el diseño estructural del nodo hidrometeorológico autónomo propuesto para la toma de datos en campo. Este soporte tiene como objetivo alojar y proteger los componentes principales del sistema de monitoreo: el panel solar, los sensores de nivel y precipitación, y el módulo de control y transmisión LoRa. El diseño está pensado para resistir condiciones ambientales adversas, garantizar estabilidad estructural y facilitar el mantenimiento de cada módulo.

| Partida | Cantidad | Costo unitario (COP) | Subtotal (COP) |
|--------------------------------------------|----------|----------------------|------------------|
| <i>A) Nodos ESP32 LoRa con sensores</i> | | | |
| Sensor ultrasónico | 5 | 385.000 | 1.925.000 |
| Pluviómetro BGT | 5 | 385.000 | 1.925.000 |
| Módulo ESP32 LoRa | 5 | 120.000 | 600.000 |
| Panel solar + regulador | 5 | 70.000 | 350.000 |
| Batería 12V | 5 | 70.000 | 350.000 |
| Caja estanca + montaje | 5 | 40.000 | 200.000 |
| Cableado y protecciones | 5 | 25.000 | 125.000 |
| Subtotal Nodos | | | 5.475.000 |
| <i>B) Gateway y Edge</i> | | | |
| Concentrador LoRa + HAT | 1 | 350.000 | 350.000 |
| Raspberry Pi 4 + SD | 1 | 300.000 | 300.000 |
| Módulo GSM SIM800 | 1 | 70.000 | 70.000 |
| Subtotal Gateway | | | 720.000 |
| <i>C) Actuadores (3 emplazamientos)</i> | | | |
| Sirena eléctrica 12-24V | 3 | 140.000 | 420.000 |
| Soportes e instalación | 3 | 30.000 | 90.000 |
| Subtotal Actuadores | | | 510.000 |
| <i>D) Software, pruebas y capacitación</i> | | | |
| Desarrollo software edge | 1 | 1.800.000 | 1.800.000 |
| <i>E) Repuestos y contingencia</i> | | | |
| Repuestos y herramientas | 1 | 400.000 | 400.000 |
| Contingencia 10 % | 1 | 800.000 | 800.000 |
| Total general proyecto | | | 9.705.000 |

Cuadro 1: Resumen del presupuesto por partida y cantidad.



Cada componente numerado cumple una función específica dentro del sistema, como se detalla en la Tabla 2.

Cuadro 2: Descripción de los componentes numerados del nodo hidrometeorológico.

| N° | Componente | Descripción y función |
|----|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Panel solar (10–20 W, 12 V) | Ubicado en la parte superior, orientado al norte para maximizar la captación solar. Proporciona energía al sistema y recarga la batería mediante un regulador de carga. |
| 2 | Pluviómetro tipo cubeta basculante (BGT) | Mide la cantidad de lluvia acumulada mediante vertimientos equivalentes a 0.2 mm. Envía pulsos eléctricos al ESP32 para el cálculo de la precipitación total e intensidad. |
| 3 | Sensor ultrasónico de nivel (0–10 m, 4–20 mA) | Montado bajo la plataforma del pluviómetro y orientado hacia el cauce. Permite medir la altura del nivel del agua sin contacto directo, estimando el caudal de flujo. |
| 4 | Caja estanca de control (ESP32 + LoRa + regulador) | Aloja los componentes electrónicos encargados de procesar las señales de los sensores y transmitir los datos al gateway LoRa. Es IP65 y resistente al polvo y agua. |
| 5 | Soporte inferior del sensor ultrasónico | Estructura metálica auxiliar que asegura la posición vertical del sensor, evitando vibraciones que afecten la precisión de la medición del nivel. |
| 6 | Poste estructural principal | Soporte metálico galvanizado anclado al suelo, con refuerzos diagonales que garantizan estabilidad frente a viento o lluvia. Sostiene toda la estructura del nodo. |

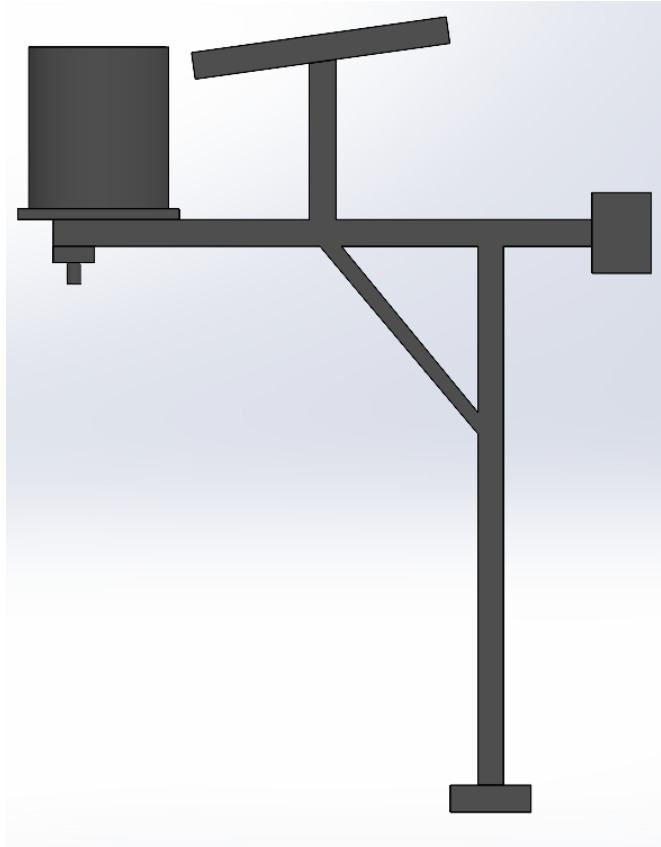


Figura 12: Vista sin numeración del montaje del nodo hidrometeorológico.

El conjunto completo conforma un nodo autónomo y resistente, capaz de operar de forma continua con energía solar. La disposición de los sensores minimiza interferencias y facilita el mantenimiento, garantizando la precisión en la medición de lluvia y nivel de agua en campo.