

# 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) × 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

## **8 CONFIGURACIÓN Y PARÁMETROS RECOMENDADOS (RESUMEN TÉCNICO)**

---

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.

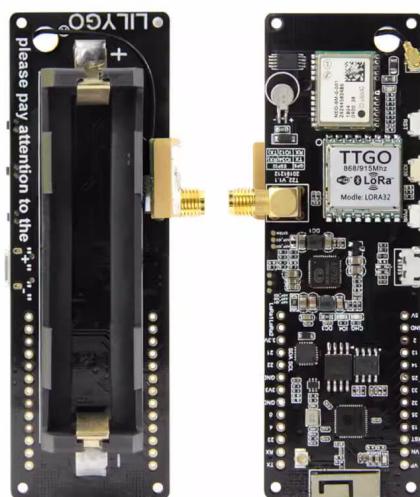


Figura 4: TTGO

■ **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 LiFePO4 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, bridás, 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-

## 8 CONFIGURACIÓN Y PARÁMETROS RECOMENDADOS (RESUMEN TÉCNICO)

etros, 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: Rasberry 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**

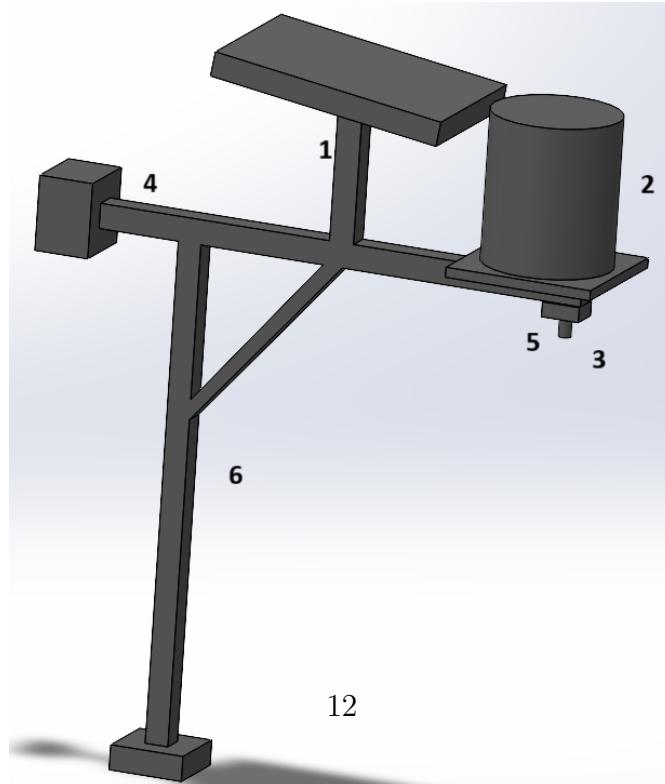
**Total proyecto (sumatoria de A–E): 9.705.000 COP.**

**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
<b>Subtotal Nodos</b>			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
<b>Subtotal Gateway</b>			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
<b>Subtotal Actuadores</b>			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
<b>Total general proyecto</b>			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.

Nº	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.

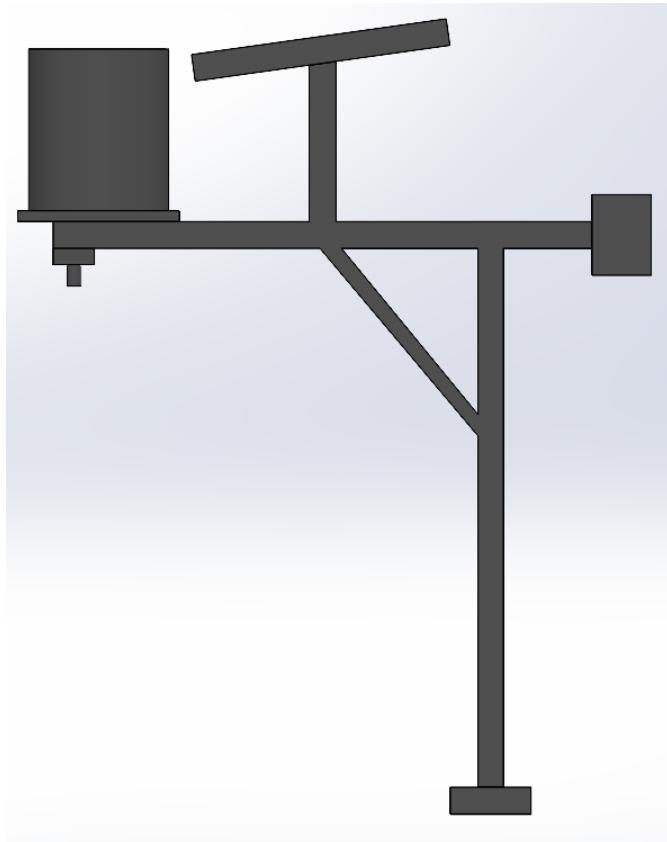


Figura 12: Vista sin numeración del montaje del nodo hidrometeorológico.

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.