

Sistema de Alerta Temprana (SAT) hidrológico basado en nivel de agua para la ciudad de Lajas (Chota, Cajamarca): diseño metodológico verificable con umbrales por frecuencia regional y telemetría LoRaWAN

Hydrological Early Warning System (EWS) based on river stage for the city of Lajas (Chota, Cajamarca): a verifiable methodological design using regional frequency thresholds and LoRaWAN telemetry

Nelve Núñez Bustamante¹[0009-0000-2218-9156]; Martha G. Huaman Tanta²[0000-0001-8407-1487]; Krantz Peláez³[0009-0007-0151-4715]; Jhan Jesús Perales Rufasto⁴[0009-0005-6668-8260]; Jesús Aler Nizzet Rafael Tiglia⁵[0009-0005-6668-8260]

¹Universidad Nacional Autónoma de Chota (UNACH), nnunhezb@unach.edu.pe. ²Universidad Nacional Autónoma de Chota (UNACH), mghuamant@unach.edu.pe. ³Universidad Nacional de Cajamarca (UNC), kpelaenza14@unc.edu.pe. ⁴Universidad Nacional Autónoma de Chota (UNACH), 2023051025@unach.edu.pe. ⁵Universidad Nacional de Cajamarca (UNC), jrafaelt_epg20@unc.edu.pe, Perú.

CITA EN APA:

Núñez Bustamante, N., Huaman Tanta, M. G., Peláez, K., Perales Rufasto, J. J., & Rafael Tiglia, J. A. N. (2026). Sistema de Alerta Temprana (SAT) hidrológico basado en nivel de agua para la ciudad de Lajas (Chota, Cajamarca): diseño metodológico verificable con umbrales por frecuencia regional y telemetría LoRaWAN. Technology Rain Journal, 5(1).
<https://doi.org/10.55204/trj.v5i1.e119>

Recibido: 12 de noviembre-2025

Aceptado: 15 de enero-2026

Publicado: 16 de febrero-2026

Technology Rain Journal
ISSN: 2953-464X



Los contenidos de este artículo están bajo una licencia de Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0). Los autores conservan los derechos morales y patrimoniales de sus obras.

Resumen. Las crecidas súbitas asociadas a precipitaciones intensas afectan recurrentemente a la ciudad de Lajas (Chota, Cajamarca), donde la ocupación urbana cercana al cauce incrementa la exposición de viviendas e infraestructura crítica. Este artículo presenta un diseño metodológico verificable de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) hidrológico basado en el monitoreo continuo del nivel del río Jalqueño, la conversión nivel-caudal mediante curvas altura-caudal y la definición de umbrales sustentados en análisis de frecuencia hidrológica, preferentemente regional con L-momentos. Se propone una arquitectura escalable y una matriz operativa de alertas orientada a impactos, priorizando costo-eficiencia, mantenibilidad y apropiación local. El estudio corresponde a un diseño conceptual-metodológico; la validación empírica mediante campañas hidrométricas y pruebas operativas se plantea como fase posterior de implementación.

Palabras Clave: curva altura-caudal, gestión del riesgo, inundaciones súbitas, L-momentos, telemetría LoRaWAN.

Abstract: Flash floods associated with intense rainfall recurrently affect the city of Lajas (Chota, Cajamarca), where urban occupation close to the river channel increases the exposure of housing and critical infrastructure. This article presents a verifiable methodological design of a hydrological Early Warning System (EWS) based on continuous monitoring of the Jalqueño River stage, stage-discharge conversion through rating curves, and the definition of thresholds supported by hydrological frequency analysis, preferably regional using L-moments. A scalable architecture and an impact-oriented operational warning matrix are proposed, prioritizing cost-effectiveness, maintainability, and local ownership. The study corresponds to a conceptual-methodological design; empirical validation through hydrometric campaigns and operational testing is proposed as a subsequent implementation phase.

Keywords: disaster risk management, flash floods, L-moments, LoRaWAN telemetry, stage-discharge rating curve.

1. INTRODUCCIÓN

La reducción del riesgo por inundaciones en ciudades intermedias requiere sistemas que integren monitoreo, umbrales cuantificables, comunicación oportuna y capacidad de respuesta comunitaria. A escala global, los reportes recientes sobre el estado de los sistemas de alerta temprana indican avances, pero también brechas persistentes, especialmente en territorios con recursos limitados (UNDRR, 2024). En el enfoque moderno se priorizan avisos orientados a impactos para facilitar decisiones preventivas y acciones tempranas (WMO, 2025). En la región Cajamarca se han documentado problemas de drenaje urbano asociados a episodios de lluvia intensa, lo que refuerza la necesidad de medidas preventivas y de alerta (Oblitas Huaman et al., 2025). En el Perú, el SENAMHI establece procedimientos para la elaboración de avisos hidrológicos y la definición de umbrales de peligro con base en datos históricos y cálculos (SENAMHI, 2022).

En la ciudad de Lajas (Chota, Cajamarca), la cercanía de sectores urbanos al cauce del río Jalqueño, sumada a eventos de lluvias intensas, incrementa la probabilidad de crecidas con afectación directa a viviendas, vías y servicios. Desde una perspectiva científica, el aporte del estudio radica en formalizar una ruta metodológica verificable que conecta la medición operativa del nivel del agua con la definición de umbrales hidrológico-hidráulicos orientados a impactos, en contextos con datos limitados.

El objetivo del estudio es formular un diseño metodológico verificable de un Sistema de Alerta Temprana hidrológico basado en nivel de agua y orientado a impactos. Los objetivos específicos son: (a) definir una ruta reproducible para la construcción y mantenimiento de curvas altura-caudal; (b) establecer un procedimiento de estimación de umbrales hidrológicos mediante análisis de frecuencia local y/o regional con L-momentos; (c) integrar una arquitectura tecnológica basada en LoRaWAN para monitoreo y alerta en tiempo real; y (d) proponer una matriz operativa de alertas vinculada a protocolos de respuesta institucional.

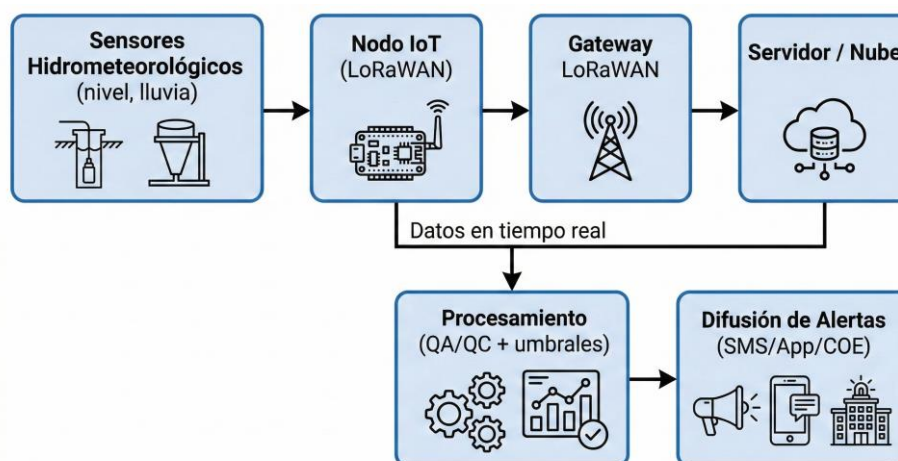


Fig. 1. Arquitectura conceptual del SAT (monitoreo–telemetría–procesamiento–difusión).

A pesar del avance en sistemas de alerta temprana hidrológicos, en contextos locales persiste una brecha metodológica recurrente entre la variable observada operativamente (nivel del agua) y la variable empleada en el diseño hidrológico e hidráulico (caudal). Esta desconexión limita la trazabilidad técnica, la reproducibilidad de los umbrales y la transferencia del conocimiento a escalas municipales. El presente estudio aborda dicha brecha mediante la formulación explícita de una ruta metodológica verificable que articula monitoreo, análisis de frecuencia, modelación hidráulica y telemetría, orientando la definición de alertas hacia impactos concretos y acciones operativas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

La investigación se desarrolla en la microcuenca del río Jalqueño, abarcando su zona de influencia directa sobre el casco urbano de la ciudad de Lajas, ubicada en el distrito homónimo, provincia de Chota (Cajamarca). Esta área representa un punto crítico de análisis debido a la interacción entre la dinámica hidrológica de la microcuenca y la vulnerabilidad de la infraestructura urbana consolidada.

2.2 Criterios de Diseño y Priorización del Sistema

El diseño conceptual del sistema se fundamenta en la identificación y caracterización de tres componentes espaciales estratégicos:

- a. Segmentos Críticos de Exposición: Delimitación de los tramos urbanos con mayor riesgo de afectación, donde la densidad de vivienda e infraestructura civil presenta una vulnerabilidad significativa ante avenidas extraordinarias.
- b. Secciones de Control Hidrométrico: Identificación de secciones transversales con estabilidad geométrica que garanticen la fiabilidad en la medición continua del nivel del agua y el ajuste de la curva altura-caudal.
- c. Estaciones de Alerta Temprana: Selección de puntos estratégicos aguas arriba, cuya ubicación técnica permita optimizar el tiempo de concentración y proporcionar un margen de anticipación suficiente para la activación de los protocolos de emergencia del COE Local.

2.3 Diseño experimental/metodológico del SAT

La investigación fue aplicada, con enfoque de ingeniería, orientada a especificar un SAT operable y verificable. El diseño se estructuró en cuatro componentes típicos de los sistemas de

alerta temprana: (i) conocimiento del riesgo, (ii) monitoreo y pronóstico, (iii) difusión y comunicación, y (iv) preparación y acción temprana (UNDRR, 2024).

2.3.1 Curva altura–caudal (nivel–caudal) y control de calidad

El monitoreo en tiempo real se basó en la variable nivel (H), por su medición continua. Para disponer de caudal (Q) como variable de diseño se requirió establecer una curva altura–caudal (rating curve), construida a partir de aforos representativos en diferentes condiciones hidráulicas. La curva altura–caudal constituye el eje metodológico que vincula la variable monitoreada operativamente con la variable empleada en el diseño hidrológico e hidráulico. Como criterio mínimo de reproducibilidad, se establece la realización de aforos distribuidos en condiciones de bajo, medio y alto caudal, el ajuste por tramos funcionales y la estimación explícita de incertidumbre, así como la verificación post-crecida y la actualización periódica de la curva. Estos criterios permiten auditar la trazabilidad de los umbrales y facilitan la replicabilidad del enfoque en cuencas con información limitada (Bekele Mena et al., 2024).

2.3.2 Estimación de caudales de diseño y definición de umbrales

La estimación de caudales de diseño se planteó mediante análisis de frecuencia. Cuando el registro local fue corto o discontinuo, se recomendó la frecuencia regional basada en L-momentos, que mejora la estabilidad de los cuantiles combinando información de estaciones hidrológicamente similares y aplicando pruebas de discordancia y homogeneidad (Li et al., 2022; Estrany-Planas et al., 2025). La selección de la distribución final se basó en criterios de bondad de ajuste y coherencia hidrológica.

Los caudales estimados (Q_T) se tradujeron a niveles (H_T) en el punto de control mediante la curva altura–caudal y/o un modelo hidráulico 1D/2D. La modelación hidráulica permitió asociar cada escenario (Q_T) a láminas de inundación, profundidades y velocidades en sectores urbanos, facilitando la definición de umbrales orientados a impactos (WMO, 2025). En coherencia con definiciones institucionales, los umbrales se formularon como rangos de peligro hidrológico derivados de datos y cálculos, con actualización conforme se obtuvo nueva evidencia (SENAMHI, 2022).

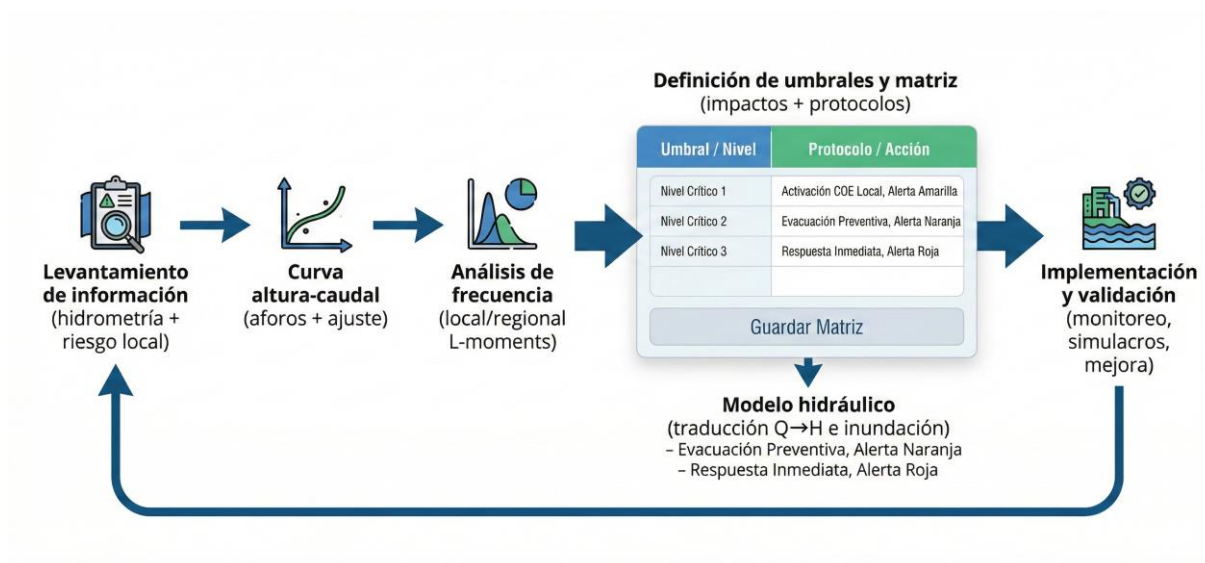


Fig. 2. Flujo metodológico para definición de umbrales y operación del SAT.

2.3.3 Selección de tecnología de monitoreo

Para medición continua de nivel se consideran sensores sin contacto (ultrasónicos o radáricos) y sensores sumergibles (presión). En ríos con transporte de sedimentos y arrastre de material, los sensores sin contacto reducen riesgos de daño mecánico y facilitan mantenimiento. No obstante, los sensores ultrasónicos pueden degradar su desempeño con niebla, lluvia intensa o turbulencia superficial; por ello se prioriza un sensor radárico de onda continua (no contacto) como solución principal y un sensor de presión como respaldo, configurados con filtros y verificación cruzada. La instalación debe asegurar línea de vista al espejo de agua, protección antivandálica y puntos de referencia para calibración altimétrica.

2.4 Transmisión de datos (telemetría)

La transmisión se propuso mediante LoRaWAN por su bajo consumo y cobertura extendida, particularmente útil en entornos semiurbanos con limitada conectividad. La selección se sustentó en especificaciones técnicas vigentes de parámetros regionales y en evidencia reciente de aplicaciones de telemetría LoRaWAN para monitoreo y alerta por inundaciones (LoRa Alliance, 2022; Jabbar et al., 2024; Zakaria et al., 2023). Se planteó un esquema con nodos clase A alimentados por energía solar y batería, un gateway en punto elevado con backhaul (4G/Internet fijo) y envío a servidor para almacenamiento y visualización.

2.5 Procesamiento, alerta y difusión

2.5.1 Plataforma de software y lógica de alerta

El procesamiento considera: (i) control de calidad automático (rangos válidos, detección de saltos, pérdida de señal), (ii) cálculo de tasa de ascenso (dH/dt) como indicador de crecida rápida, y (iii) comparación con umbrales por nivel/caudal. Se adopta una lógica híbrida: alerta por excedencia de umbral y por tendencia (rate-of-rise), consistente con soluciones IoT recientes para monitoreo y advertencia de inundaciones basadas en LoRaWAN (Zakaria et al., 2023).

2.5.2 Protocolo de comunicación y difusión

La difusión debe ser redundante y orientada a usuarios: tablero web para autoridades, notificación por SMS/WhatsApp y sirena local en puntos críticos. El protocolo de emisión debe articularse con los roles del COE local y el marco de respuesta ante lluvias intensas y peligros asociados. A nivel nacional, el procedimiento de SENAMHI incluye referencias a lineamientos y protocolos de coordinación interinstitucional (SENAMHI, 2022).

2.6 Capacidad de respuesta y sostenibilidad

La efectividad de un SAT dependió del componente social: apropiación local, entrenamiento y simulacros. Se propuso un plan de implementación con: (a) acuerdos de operación y mantenimiento (municipalidad–defensa civil–comunidad), (b) protocolos de actuación por nivel de alerta, (c) simulacros periódicos y evaluación post-evento, y (d) repositorio de datos para aprendizaje y mejora continua (UNDRR, 2024).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El resultado principal es la especificación de una arquitectura y una ruta de umbrales verificable. Como resultado del diseño, se definen parámetros operativos de referencia, tales como la resolución y frecuencia de muestreo del sensor, la latencia máxima admisible para la emisión de alertas y criterios de disponibilidad del enlace de comunicación, los cuales deberán validarse durante la fase de implementación. La Figura 1 resume la arquitectura de hardware y software; la Figura 2 sintetiza el flujo metodológico. Adicionalmente, se propone una matriz operativa de alertas (Tabla 1) que deberá calibrarse con evidencia local (marcas de inundación, reportes, validación hidráulica) antes de su adopción oficial.

Tabla 1. Matriz operativa referencial (los umbrales H1–H3 y Q2a–Q25a se calibran con datos y modelación).

Nivel de alerta	Criterio hidrológico (ejemplo)	Criterio operativo	Acciones mínimas
-----------------	-----------------------------------	--------------------	------------------

Amarilla	$H \geq H1$ o $Q \geq Q2a$	Vigilancia reforzada	COE local activa monitoreo; difusión preventiva.
Naranja	$H \geq H2$ o $Q \geq Q5a$	Alerta	Movilización de brigadas; pre-evacuación en puntos críticos.
Roja	$H \geq H3$ o $Q \geq Q10a$ – Q25a	Alarma	Evacuación y cierre de vías vulnerables; activación de albergues.

El aporte del diseño propuesto se centró en abordar la incoherencia frecuente entre la variable monitoreada (nivel) y la variable utilizada para diseño y comunicación técnica (caudal). Al explicitar la necesidad de la curva altura–caudal, su mantenimiento y la estimación de incertidumbre, el SAT pudo evolucionar desde un esquema empírico hacia uno trazable y auditable (Ali et al., 2023; Mailhot et al., 2025; SENAMHI, 2022).

La definición de umbrales con enfoque de impactos fortaleció la utilidad social del SAT: no se trató solo de exceder un valor de caudal, sino de anticipar dónde y cómo se manifestaría la inundación y qué acciones serían pertinentes. Esta lógica fue consistente con servicios de pronóstico y aviso orientados a impactos (WMO, 2025) y con el diagnóstico reciente de brechas en sistemas de alerta temprana (UNDRR, 2024).

En el plano tecnológico, LoRaWAN permite escalar la red de sensores con bajo consumo energético. Experiencias recientes demuestran su factibilidad en monitoreo y advertencia de inundaciones con nodos solares y pasarelas locales (Zakaria et al., 2023). La selección de sensor radárico y respaldo por presión reduce la vulnerabilidad ante niebla, lluvia intensa y fluctuaciones del espejo de agua, aunque aumenta el costo unitario; esta decisión se justifica por la criticidad del dato en escenarios de emergencia.

Limitaciones: el presente manuscrito corresponde a un diseño conceptual. Para una implementación completa se requiere: (i) campaña hidrométrica y construcción de la curva altura–caudal; (ii) obtención de evidencias de eventos (marcas, afectaciones) para calibrar el modelo hidráulico; y (iii) evaluación de desempeño del sistema (falsas alarmas, disponibilidad, latencia). Estas actividades forman parte del plan de validación propuesto (Figura 2). Estas limitaciones no invalidan el enfoque metodológico, sino que delimitan su alcance y orientan futuras investigaciones aplicadas.

4. CONCLUSIONES

Se formuló un diseño metodológico conceptual de SAT hidrológico para la ciudad de Lajas basado en monitoreo continuo del nivel del río Jalqueño, conversión nivel–caudal

mediante curva altura–caudal y umbrales derivados de análisis de frecuencia (local y/o regional).

La ruta metodológica integra levantamiento hidrométrico, análisis de frecuencia regional con L-momentos, modelación hidráulica para traducir caudales en niveles e impactos, y una matriz operativa de alertas orientada a acciones.

La arquitectura tecnológica propuesta (sensores no-contacto, telemetría LoRaWAN, plataforma de procesamiento y canales redundantes de difusión) prioriza bajo consumo, escalabilidad y mantenimiento local, alineándose con buenas prácticas y procedimientos nacionales.

Para dejar el SAT en operación se recomienda ejecutar la fase de validación: curva altura–caudal con aforos, calibración hidráulica con evidencias de eventos, pruebas de comunicación y simulacros comunitarios para asegurar efectividad y sostenibilidad.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Municipalidad Provincial de Chota y a las autoridades locales de Lajas por la información de contexto y facilidades brindadas durante el levantamiento conceptual.

FINANCIAMIENTO

La investigación no recibió financiamiento específico de agencias del sector público, privado o sin fines de lucro.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA (Obligatorio)

En concordancia con la taxonomía establecida internacionalmente para la asignación de créditos a autores de artículos científicos (<https://credit.niso.org/>). Los autores declaran sus contribuciones en la siguiente matriz:

	Nelve Núñez	Martha G. Huaman	Krantz Peláez	Jesús Perales
Participar activamente en:				
Conceptualización	X		X	
Análisis formal	X	X		
Adquisición de fondos	X		X	X
Investigación	X	X	X	X
Metodología	X	X	X	
Administración del proyecto	X			
Recursos	X	X	X	X
Redacción –borrador original	X	X	X	X
Redacción –revisión y edición	X	X	X	X
La discusión de los resultados	X		X	X
Revisión y aprobación de la versión final del trabajo.	X	X		

REFERENCIAS

- Ali, G., & Maghrebi, M. F. (2023). A robust approach for the derivation of rating curves using minimum gauging data. *Journal of Hydrology*, 623(4), 129609. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129609>
- Bekele Mena, N., Ayele, E. G., Chora, H. G., & Dada, T. T. (2024). Assessing the effect of rating curve uncertainty in streamflow simulation on Kulfo watershed, Southern Ethiopia. *Journal of Water and Climate Change*, 15(9), 4199–4219. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.645>
- Estrany-Planas, P., Blanco-Gómez, P., Ortiz-Vallespi, J. I., Orihuela-Martínez, J., & Vilarrasa, V. (2025). Regional frequency analysis using L-moments for determining daily rainfall probability distribution function and estimating the annual wastewater discharges. *Hydrology*, 12(6), 152. <https://doi.org/10.3390/hydrology12060152>
- Jabbar, W. A., Ting, T. M., Hamidun, M. F. I., Che Kamarudin, A. H., Wu, W., Sultan, J., Alsewari, A. A., & Ali, M. A. H. (2024). Development of LoRaWAN-based IoT system for water quality monitoring in rural areas. *Expert Systems with Applications*, 242, 122862. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122862>
- Li, M., Liu, M., Cao, F., Wang, G., Chai, X., & Zhang, L. (2022). Application of L-moment method for regional frequency analysis of meteorological drought across the Loess Plateau, China. *PLOS ONE*, 17(9), e0273975. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273975>
- LoRa Alliance. (2022). LoRaWAN® Regional Parameters (RP002-1.0.4). https://loraalliance.org/resource_hub/rp002-1-0-4-lorawan-regional-parameters/
- Mailhot, A., Talbot, G., Bolduc, S., & Fortier, C. (2025). Assessment of uncertainties in stage–discharge rating curves: A large-scale application to Quebec hydrometric network. *Hydrology and Earth System Sciences*, 29, 3615–3627. <https://doi.org/10.5194/hess-29-3615-2025>
- Oblitas Huaman, J. M., Vásquez Tapia, L. A., Miranda, E. H., Zavaleta, A. Y., & Nureña Chávez, H. A. (2025). Inundaciones pluviales en Chota y estrategias para la reducción del riesgo en la planificación urbana. *Ciencia Nor@ndina*, 8(2), 22–29.
- SENAMHI. (2022). Procedimientos para la elaboración de avisos hidrológicos en el Perú. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/2545>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2024). Global status of multi-hazard early warning systems 2024. <https://www.undrr.org/publication/global-status-multi-hazard-early-warning-systems-2024>
- World Meteorological Organization (WMO). (2025). Impact-based forecast and warning services. <https://wmo.int/impact-based-forecast-and-warning-services>
- Zakaria, N. A., Zainal, N. A., Razali, M. A., Yasin, M. A. M., & Noor, N. A. M. (2023). Development of smart sensing unit for flood monitoring system based on LoRaWAN. *Sensors & Transducers*, 286, 249–261.