

Impact of Hourly Time Resolution on Hydrological Modeling of Ungauged Basins: A Systematic Review of Accuracy

Ventura Huaman Ruth Liliana¹ ; Arosquipa Nina Yvan Manuel² 

^{1,2}Universidad Científica del Sur, Lima, 100092941@cientifica.edu.pe, yarosquipa@cientifica.edu.pe

Abstract– *Flood risk management in ungauged basins faces critical limitations due to the scarcity of in-situ data and the inadequacy of daily records to capture the dynamics of extreme events. The main objective of this study was to evaluate, through a systematic review using the PRISMA methodology, the impact of hourly temporal resolution on the accuracy of hydrological models in ungauged basins compared to daily scales. Seventy scientific articles from Scopus, Web of Science, and ScienceDirect, published between 2010 and 2025, were analyzed. The results show that hourly resolution drastically reduces the uncertainty in estimating peak flows and time to peak, overcoming the systematic underestimation inherent in daily aggregation, a crucial factor for flash flood modeling. Furthermore, the integration of high-resolution satellite precipitation products with machine learning techniques and data fusion was identified as the most effective strategy to address the lack of information. It is concluded that the adoption of the time scale constitutes an indispensable paradigm shift for the development of robust early warning systems and the design of resilient infrastructures in the face of climate change.*

Keywords– *Precipitation hourly, ungauged basin, flood risk, flash flood.*

I. INTRODUCCIÓN

Las variaciones en las precipitaciones extremas y la incertidumbre asociada a estas variaciones han mostrado un impacto directo en la magnitud de los caudales de diseño utilizados en la gestión de inundaciones [1-4]. En este contexto, la gestión de riesgos de inundación exige herramientas y datos que permitan estimar caudales máximos para distintos periodos de retorno, con el fin de diseñar infraestructuras hídricas y medidas de mitigación adecuadas a contextos geográficos y climáticos heterogéneos [5-7]. Sin embargo, una de las principales limitaciones para la gestión del riesgo es la escasez de registros hidrometeorológicos locales y la falta de integración sistemática de datos climatológicos e hidrológicos para una estimación precisa de caudales máximos [6], [8-12].

Esta carencia de información dificulta la elaboración de mapas de peligro, la planificación de obras de protección y la implementación de sistemas de alerta temprana, incrementando la exposición de la población a desastres recurrentes [2], [6], [10-11], [13-16].

El riesgo de inundación es una amenaza global persistente, intensificada por la creciente magnitud y frecuencia de los eventos de precipitación extrema relacionados con el cambio climático, junto con la rápida e incontrolada expansión urbana en zonas históricamente vulnerables [4]. Este fenómeno ha provocado pérdidas económicas y sociales significativas en diversos contextos,

desde grandes áreas metropolitanas como Jeddah y Nueva York, hasta cuencas con escasez de infraestructura como las de Perú y Haití [7]. El desafío primordial para la gestión efectiva de este riesgo radica en la escasez de datos hidrométricos y pluviométricos confiables y de largo plazo en las cuencas, una limitación crítica especialmente en regiones en desarrollo [4], [7], [12].

Frente a este desafío, investigaciones recientes han desarrollado y validado productos de alta resolución para aumentar la capacidad de modelación hidrológica y climática a nivel nacional. Un caso destacado es el estudio de [17], quienes presentaron un conjunto de datos de precipitación horaria de alta resolución espacial ($0.1^\circ \times 0.1^\circ$) para todo el territorio peruano (2015–2020). Este producto, resultado de la desagregación temporal de la precipitación diaria del sistema PISCOp y la integración de datos de estaciones automáticas y precipitación satelital sin corrección, tiene como objetivo mejorar la calibración y validación de modelos locales proporcionando una representación temporal más detallada.

Sin embargo, más allá de la cobertura espacial, la resolución temporal de los datos de precipitación se ha identificado como un factor determinante para la precisión hidrológica. La evidencia reciente señala que las heterogeneidades espaciales y temporales de la lluvia tienen un impacto significativo en la distribución del pico de escorrentía y la intensidad del flujo, variaciones que se pierden al promediar los datos [18]. El uso de registros diarios a menudo resulta insuficiente para capturar la dinámica de tormentas de corta duración, subestimando significativamente el caudal máximo en cuencas de respuesta rápida y mesoescala bajo escenarios futuros [19]. Además, en zonas de topografía compleja, los gradientes orográficos generan patrones de lluvia sub-diaria que los datos agregados no logran representar adecuadamente, afectando la modelización de procesos físicos conexos como la erosividad de la lluvia [20], [21].

Para superar estas limitaciones en cuencas no aforadas, la literatura actual ha validado el uso de productos satelitales de alta resolución (como GPM-IMERG y GSMaP) y técnicas de fusión con Machine Learning para generar series horarias fiables [22], [23]. Estos datos alimentan modelos hidrológicos avanzados, desde adaptaciones sub-diarias de modelos físicos como SWAT, capaces de simular flash floods con mayor precisión [24], hasta arquitecturas híbridas y redes neuronales profundas diseñadas para reducir la incertidumbre predictiva en zonas con escasez de datos [25], [26]. No obstante, la fiabilidad de estos productos varía geográficamente, requiriendo validaciones rigurosas para asegurar que no

introduzcan errores estructurales en los sistemas de alerta temprana y la definición de umbrales de lluvia [27], [28].

Ante la necesidad de mejorar las predicciones en zonas con escasez de datos, esta revisión sistemática se plantea la siguiente interrogante de investigación: ¿Cuál es el impacto de la resolución temporal horaria en la precisión y desempeño de los modelos hidrológicos aplicados a cuencas no aforadas, en comparación con el uso de escalas diarias?

El objetivo principal de este estudio es evaluar, mediante una revisión sistemática, el impacto de la resolución temporal horaria en la precisión y el desempeño predictivo de los modelos hidrológicos en cuencas no aforadas, identificando las principales ventajas y limitaciones. Para cumplir con este propósito, se plantean los siguientes objetivos específicos: (i) caracterizar las metodologías de modelización y las fuentes de datos (satelitales, reanálisis, radares) utilizadas predominantemente en la literatura reciente para la simulación hidrológica a resolución horaria en cuencas no aforadas, (ii) determinar el impacto cuantitativo de la resolución horaria sobre las métricas de precisión y desempeño al ser comparada con resoluciones temporales diarias o agregadas, (iii) sistematizar las principales ventajas operativas y limitaciones técnicas reportadas en los estudios seleccionados, con énfasis en la capacidad de reproducir eventos extremos y la gestión de incertidumbre en zonas con escasez de datos.

II. METODOLOGÍA

Se ha realizado una revisión sistemática de la literatura (RSL) donde se empleó diversos artículos científicos. El proceso de recopilación de datos se basó en la metodología PICOC. A continuación la Tabla I presenta el desglose de los componentes considerados.

Tabla I
Componentes PICOC

P	Problema	Modelización hidrológica en cuencas no aforadas.
I	Intervención	Uso de resolución temporal horaria.
C	Comparación	Resolución temporal diaria.
O	Resultado	Precisión y desempeño del modelo.
C	Contexto	Cuencas no aforadas.

En el contexto de la gestión del riesgo de inundaciones, especialmente frente a eventos de inundación repentina en zonas con escasez de datos, es crucial evaluar estrategias que reduzcan la incertidumbre predictiva. A continuación, se presentan las preguntas de investigación formuladas para analizar sistemáticamente el impacto de incorporar precipitación horaria en la precisión de la modelización de cuencas no aforadas.

Q1-PROBLEMA: ¿Cuáles son los desafíos y limitaciones actuales en la modelización hidrológica de cuencas no aforadas reportados en la literatura?

Q2-INTERVENCIÓN: ¿Cómo influye la implementación de la resolución temporal horaria en la representatividad de los procesos hidrológicos simulados?

Q3-COMPARACIÓN: ¿Existe una mejora significativa en la precisión de los modelos al comparar la escala horaria frente a la resolución diaria u otras escalas?

Q4-RESULTADO: ¿Qué impacto tiene la resolución horaria en las métricas de precisión y desempeño de los modelos hidrológicos?

Q5-CONTEXTO: ¿En qué contextos geográficos y climáticos se ha validado predominantemente el uso de la resolución horaria en cuencas no aforadas a nivel global?

Se realizó una revisión sistemática siguiendo la metodología PRISMA, una guía actualizada y ampliamente aceptada para elaborar este tipo de revisiones. PRISMA facilita la identificación, selección, evaluación y síntesis de estudios, asegurando rigor y reproducibilidad en todo el proceso. Además, incluye una lista de verificación que abarca desde la formulación de la pregunta de investigación hasta la presentación de resultados, lo que permite una documentación adecuada y una evaluación crítica del trabajo. Esto también facilita que otros investigadores repliquen y actualicen la revisión conforme aparezca nueva evidencia, fortaleciendo la transparencia y fiabilidad de los hallazgos [29].

La búsqueda se realizó en las bases de datos, Scopus, Web of Science y ScienceDirect con la intención de responder a la siguiente pregunta, ¿Cuál es el impacto de la resolución temporal horaria en la precisión y desempeño de los modelos hidrológicos aplicados a cuencas no aforadas, en comparación con el uso de escalas diarias?

La cadena de búsqueda utilizada fue la siguiente:

Scopus, ScienceDirect y Web of Science

(“precipitation hourly” AND “ungauged basin” AND “flood risk” AND “flash flood”)

Para asegurar la relevancia y la calidad de los estudios, se aplicó un conjunto riguroso de criterios de inclusión y exclusión, los cuales son visibles en la Tabla II.

Tabla II
Criterios de exclusión e inclusión

Criterio	Inclusión	Exclusión
C1: Período de publicación	Publicados entre 2010 y 2025.	Publicados fuera del período 2010–2025.
C2: Idioma	Publicaciones en español y/o inglés.	Publicados en idiomas distintos al español o al inglés.
C3: Intervención (Resolución temporal)	Estudios que evalúen datos de precipitación a resolución horaria o sub-diaria para la modelización.	Estudios que utilicen exclusivamente escalas diarias, mensuales o anuales.
C4: Contexto de estudio	Aplicados a cuencas no aforadas, poco aforadas o con técnicas de regionalización.	Estudios realizados en cuencas altamente instrumentadas sin simular escasez de datos.
C5: Tipo de documento	Artículos científicos originales (research articles).	Tesis, capítulos de libros, conferencias, notas editoriales o literatura gris.
C5: Acceso al Contenido	Texto completo accesible.	Solo resumen (abstract) disponible o acceso restringido irre recuperable.

A. Fuentes de Información

La selección de ScienceDirect, Scopus y Web of Science responde a una estrategia de triangulación de fuentes de alto impacto. Mientras que ScienceDirect provee acceso directo a literatura técnica especializada en ingeniería e hidrología de Elsevier, Scopus garantiza una cobertura multidisciplinaria con una robusta trazabilidad de citas. Por su parte, Web of Science asegura la inclusión de revistas con los factores de impacto más rigurosos del JCR, permitiendo una síntesis bibliográfica que no solo es actual, sino metodológicamente robusta para el análisis de la gestión de riesgos.

B. Estrategias de Búsqueda

Se realizaron búsquedas en tres bases de datos indizadas: Scopus, Web of Science y ScienceDirect. En estas bases de datos se construyeron cadenas de búsqueda específicas para capturar literatura relevante en el área de interés, priorizando la escala temporal. Se incluyeron términos relacionados con la entrada de datos como "hourly precipitation" OR "sub-daily rainfall" y "high temporal resolution", combinados con el contexto de estudio mediante términos como "ungauged basin" OR "data scarce" y expresiones de modelado hidrológico (por ejemplo, "hydrological modeling", "rainfall-runoff model" o "streamflow simulation"). No se aplicaron filtros avanzados inicialmente. Luego se exportaron los metadatos para su revisión, se eliminaron duplicados y documentos no pertinentes, y se continuó con el análisis de abstracts y finalmente de textos completos. Estas búsquedas permitieron reunir el conjunto inicial de estudios para evaluar la precisión de los modelos bajo diferentes resoluciones temporales.

C. Descripción del Proceso de Selección

Se realizaron búsquedas en tres bases de datos: Scopus, Web of Science y ScienceDirect, identificando un total de 791 documentos. Tras eliminar duplicados y aplicar criterios de exclusión, se seleccionaron 619 documentos para el siguiente paso.

Screening, se revisaron los resúmenes de 619 documentos para evaluar su relevancia con respecto al tema de estudio. El criterio de inclusión fue que el resumen indicara relación con la pregunta de investigación. Como resultado de este cribado, 176 documentos cumplieron con el criterio y avanzaron a la siguiente etapa; los demás fueron eliminados por no ser relevantes o por no cumplir con los criterios de elegibilidad basados en el resumen.

Screening-not retrieved, e evaluó el acceso a los documentos para identificar cuáles estaban disponibles. Como resultado, se encontraron 139 documentos accesibles para revisión y análisis detallado, los cuales avanzaron al paso de inclusión para una revisión en profundidad. Tras la lectura del texto completo de cada artículo, se obtuvieron un total de 52 documentos incluidos, que fueron evaluados mediante 17 ítems.

D. Proceso de extracción de datos

El flujo de trabajo se registró siguiendo las guías de PRISMA y se gestionó en Excel, lo que facilitó el registro transparente de búsquedas y la eliminación de duplicados, la aplicación reproducible de criterios de selección y la documentación de razones de exclusión en cada etapa, abarcando 619 eliminaciones en el cribado inicial, 176 descartes en la segunda fase, 139 que no cumplieron con la elegibilidad de texto completo y 52 excluidos por criterios finales de calidad o pertinencia, además se agregaron 18 artículos complementarios.

III. RESULTADOS

A continuación, se presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos de la muestra final de artículos, identificados como pertinentes para la investigación en curso.

La Fig. 1, muestra la distribución temporal de los 67 artículos seleccionados, abarcando el periodo comprendido entre 2014 y 2025. Se evidencia una tendencia de crecimiento exponencial en la producción científica, concentrándose la mayor actividad en el último lustro. El año 2024 se destaca como el de mayor relevancia con 15 publicaciones, seguido inmediatamente por 2025 con 13 artículos, lo que sugiere que la temática se encuentra actualmente en su punto álgido de interés académico.

Asimismo, se observa un pico significativo en 2021 con 10 artículos, marcando un punto de inflexión en la cantidad de investigaciones. Los años 2023, 2019 y 2022 muestran una producción intermedia considerable, con 7, 6 y 5 publicaciones respectivamente. En contraste, el periodo inicial y medio muestra una frecuencia más baja y estable; los años 2015, 2016, 2017, 2018 y 2020 registran una constancia de 2 artículos por año, mientras que 2014 presenta la menor frecuencia con solo una publicación. En conjunto, esta cronología demuestra que más del 60% de la evidencia científica analizada se ha generado en los últimos cinco años, reflejando la urgencia y vigencia actual del tema.

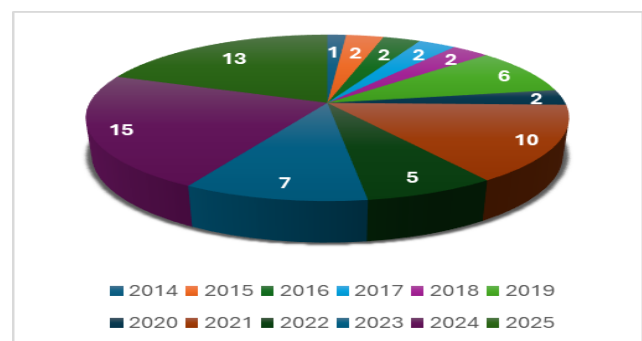


Fig. 1 Producción de artículos por años

La Fig. II, ilustra la distribución geográfica de los países de origen de los artículos seleccionados, revelando una marcada polarización en la producción científica. China lidera indiscutiblemente la lista con 19 artículos, lo que representa la

mayor contribución individual y evidencia el intenso enfoque de la región asiática en esta temática. Le sigue Estados Unidos con 7 publicaciones, consolidándose como el principal referente occidental. Un segundo bloque de alta productividad está conformado por Francia e India, con 6 artículos cada uno. En un nivel intermedio, se observa la participación de Alemania, Italia y Arabia Saudita, aportando 3 estudios por nación. Asimismo, un grupo heterogéneo de países contribuye con 2 artículos cada uno, incluyendo a Grecia, Países Bajos, Reino Unido, España, Corea del Sur y Haití. Finalmente, el resto de la muestra presenta una dispersión global con una única contribución (1 artículo) por país, abarcando naciones de América Latina (Perú, Colombia, México), Europa (Macedonia, Noruega), África (Egipto) y Asia (Vietnam, Malasia). La gráfica denota una investigación globalmente activa, pero con una clara hegemonía de países asiáticos y potencias norteamericanas y europeas.

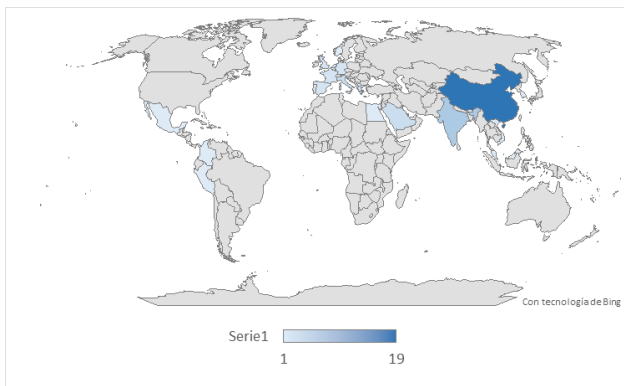


Fig. II Producción de Artículos por Países

A continuación, se presenta el desarrollo de las preguntas que guían esta investigación. Cada una de ellas permite analizar de manera precisa los elementos clave del estudio, atendiendo tanto a la identificación del problema como a la evaluación de la intervención, comparación, los resultados obtenidos y el contexto temporal considerado.

Q1-PROBLEMA: ¿Cuáles son los desafíos y limitaciones actuales en la modelización hidrológica de cuencas no aforadas reportados en la literatura?

La revisión de la literatura identifica que el principal desafío en cuencas no aforadas no es solo la falta de datos de caudal para calibración, sino la incertidumbre estructural de los datos de entrada. Los estudios reportan consistentemente tres limitaciones críticas:

A. Representatividad Inadecuada de la Variabilidad Espacio-temporal

Los pluviógrafos tradicionales son escasos y no capturan la heterogeneidad de las tormentas convectivas, lo que lleva a una subestimación sistemática de los picos de flujo en modelos distribuidos [18], [30], [31].

B. Sesgo en Productos Satelitales (HRPP)

Aunque los productos satelitales (como GPM-IMERG, GSMaP) ofrecen cobertura global, presentan errores significativos en zonas de topografía compleja y costas, tendiendo a sobreestimar lluvias ligeras y subestimar eventos extremos, lo que requiere procesos de corrección de sesgo obligatorios antes de su uso [28], [32], [33].

C. Complejidad en la Regionalización de Parámetros

La transferencia de parámetros de cuencas aforadas a no aforadas sigue siendo problemática. Los métodos tradicionales de regresión lineal a menudo fallan en capturar la no linealidad de la respuesta hidrológica horaria, impulsando la necesidad de técnicas avanzadas como Random Forest o redes neuronales [34], [35].

La Tabla III resume los principales desafíos y limitaciones identificados en la revisión sistemática respecto a la modelización de cuencas no aforadas. Esta síntesis agrupa las dificultades recurrentes reportadas por los autores, destacando la escasez de datos *in situ* y la complejidad en la calibración de parámetros.

Tabla III

Principales Desafíos Reportados en la Modelización de Cuencas no Aforadas

Desafío identificado	Descripción del problema	Cita
Escala temporal gruesa	El uso de datos diarios suaviza los hietogramas, ocultando la intensidad real detonante de flash floods.	[18], [19], [36]
Efecto de "Lumping"	La promediación espacial en cuencas grandes enmascara la variabilidad local de la lluvia.	[31], [37]
Incertidumbre satelital	Errores de detección y falsas alarmas en productos satelitales sin corregir.	[38-40]
Falta de calibración	Imposibilidad de validar modelos físicos tradicionales sin datos de aforo <i>in situ</i> .	[25], [41]

D. Exposición y Vulnerabilidad Socioeconómica

Q2-INTERVENCIÓN: ¿Cómo influye la implementación de la resolución temporal horaria en la representatividad de los procesos hidrológicos simulados?

La implementación de la resolución horaria transforma radicalmente la capacidad del modelo para simular la dinámica interna de la escorrentía. La evidencia sugiere que el paso de tiempo horario permite:

A. Captura de Picos Rápidos

En cuencas pequeñas (<500 km²) y entornos urbanos, la resolución horaria es la única capaz de representar el tiempo al pico (time-to-peak) y la rama ascendente del hidrograma, procesos que los modelos diarios simplifican excesivamente [24], [42], [43].

B. Modelización de Procesos Físicos Conexos

A diferencia de la escala diaria, la intensidad horaria permite estimar la energía cinética de la lluvia, crucial para modelar la erosión del suelo (factor-R en RUSLE) y el transporte de sedimentos durante eventos extremos [21].

C. Identificación de Patrones de Lluvia

Permite distinguir entre diferentes tipos de eventos (convectivos vs. estratiformes) y su contribución específica a la generación de escorrentía rápida superficial frente al flujo base [44], [45].

Q3-COMPARACIÓN: ¿Existe una mejora significativa en la precisión de los modelos al comparar la escala horaria frente a la resolución diaria (u otras escalas)?

Sí, la literatura confirma una mejora significativa, pero esta depende del tamaño de la cuenca y el tipo de evento.

A. Superioridad en Eventos Extremos

Al comparar simulaciones, los modelos horarios reducen drásticamente el error en la estimación del caudal pico (Q_{peak}). Estudios comparativos muestran que los modelos diarios tienden a subestimar los caudales máximos de avenidas repentinas, mientras que los modelos horarios logran una aproximación mucho más cercana a la realidad observada o reconstruida [19], [36].

B. Impacto en Escenarios Futuros

En proyecciones de cambio climático, la modelización diaria falla al no capturar la intensificación de las tormentas cortas, resultando en una subestimación del riesgo futuro de inundación. La escala horaria corrige este sesgo negativo [19].

C. Limitaciones

Sin embargo, algunos estudios indican que para el balance hídrico mensual o anual (volumen total), la mejora de la escala horaria es marginal o nula comparada con la diaria [23].

El análisis de las métricas de eficiencia permite evaluar la ganancia en precisión al reducir el paso de tiempo de la simulación. La Tabla IV presenta una comparativa detallada del desempeño de los modelos bajo escalas horarias y diarias, contrastando indicadores estadísticos clave como el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) y el error cuadrático medio (RMSE) reportados en los estudios seleccionados.

Tabla IV
Comparativa de Desempeño: Escala Horaria vs. Diaria

Aspecto evaluado	Desempeño Escala diaria	Desempeño Escala horaria	Hallazgo principal	Cita
Caudal Pico (Q_{peak})	Tendencia a la subestimación sistemática.	Mejora significativa en la magnitud del pico.	Crucial para diseño de infraestructura.	[19], [36]
Tiempo Pico (T_p)	Baja precisión; desfase temporal	Alta precisión en la sincronización del evento.	Vital para sistemas de alerta temprana.	[24], [43]

	frecuente.			
Volumen de Escorrentía	Aceptable para balances de largo plazo.	Similar al diario en volúmenes acumulados.	La escala horaria no aporta gran mejora en volumen total.	[23]

Q4-RESULTADO: ¿Qué impacto tiene la resolución horaria en las métricas de precisión y desempeño de los modelos hidrológicos?

El uso de datos horarios impacta positivamente en las métricas de eficiencia, especialmente en aquellas sensibles a los valores extremos.

A. Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

Se reportan incrementos en los valores de NSE al pasar de diario a horario en cuencas de respuesta rápida, alcanzando valores > 0.7 en simulaciones de eventos específicos tras la corrección de sesgo de los datos satelitales [32], [46], [47].

B. Error Relativo de Pico (RE)

La resolución horaria reduce significativamente el error porcentual en la estimación del caudal pico, bajando a rangos aceptables ($<20\%$) en comparación con errores $>40\%$ frecuentes en simulaciones diarias agregadas [23], [48].

C. Kling-Gupta Efficiency (KGE)

Esta métrica, que balancea correlación y variabilidad, muestra mejoras consistentes en modelos híbridos (físicos + Machine Learning) alimentados con datos horarios, superando a los modelos hidrológicos puros [25], [49].

Q5-CONTEXTO: ¿En qué contextos geográficos y climáticos se ha validado predominantemente el uso de la resolución horaria en cuencas no aforadas a nivel global?

La revisión revela una concentración geográfica de los estudios, aunque con una creciente diversificación climática.

A. Dominancia Asiática

Una gran parte de la validación proviene de cuencas en China (regiones húmedas del sur, meseta tibetana y cuencas montañosas), impulsada por la necesidad de gestionar flash floods y la disponibilidad de productos como CMAP y datos de radar [35], [38], [46], [53].

B. Regiones Áridas y Semiáridas

Se han realizado avances significativos en el Medio Oriente (Arabia Saudita) y zonas mediterráneas, donde la lluvia es escasa pero torrencial, demostrando el valor de los datos satelitales corregidos [18], [22].

C. Topografía Compleja

Los estudios se enfocan predominantemente en cuencas montañosas y de alta pendiente (Himalaya, Andes, Alpes), donde la respuesta hidrológica es rápida y la falta de estaciones es crítica [21], [26], [51].

D. Entornos Urbanos

Existe una tendencia emergente a aplicar estos modelos en ciudades con drenaje complejo y sin aforo (ej. Karachi, India urbana), utilizando enfoques híbridos [42], [52].

Para comprender la aplicabilidad de los modelos en distintos entornos, se analizó la ubicación de las zonas de estudio. La Tabla V, detalla la distribución geográfica y climática de los artículos seleccionados.

Tabla V
Distribución Geográfica y Climática de los Estudios Seleccionados

Artículo	Región / Contexto	Característica climáticas	Enfoque principal
[18], [32], [53]	China (Sur y Este)	Húmedo / Monzónico	Validación de satélites (GPM, CMA) para flash floods.
[20], [23]	China (Oeste/Tibet)	Montañoso / Frío	Escalamiento temporal y efectos orográficos.
[22]	Medio Oriente (Arabia)	Árido / Desértico	Fusión de datos (ML) para eventos raros extremos.
[50], [54], [55]	Europa (Mediterráneo)	Semiárido / Estacional	Impacto del uso del suelo y nowcasting.
[21]	Sudamérica (Andes)	Tropical de Montaña	Erosividad y validación satelital en zonas complejas.
[42], [52], [56]	Asia del Sur (India/Pakistán)	Tropical / Ciclónico	Inundaciones urbanas y costeras.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados de esta revisión sistemática confirman que la transición de la escala diaria a la horaria no constituye únicamente una mejora incremental en la resolución de datos, sino un cambio de paradigma necesario para la gestión eficiente de riesgos en cuencas no aforadas. A continuación, se discuten las implicaciones de estos hallazgos en cuatro ejes fundamentales: la dinámica física de los eventos, la revolución de los datos satelitales, el auge de la inteligencia artificial y las limitaciones operativas.

Mientras que la modelización diaria ha demostrado ser suficiente para balances hídricos de largo plazo, la literatura analizada indica que es estructuralmente incapaz de reproducir la dinámica de las inundaciones repentinas (flash floods). Estudios sobre el comportamiento de escalamiento temporal en regiones templadas como Alemania y tropicales como Tailandia revelan que las relaciones intensidad-duración-frecuencia (IDF) de la lluvia extrema siguen patrones de escala complejos que se suavizan y pierden al agregar los datos a 24 horas [45], [57].

Esta pérdida de información de alta frecuencia explica por qué los modelos diarios fallan sistemáticamente en predecir el tiempo al pico (time-to-peak) en cuencas urbanas y de montaña, subestimando la magnitud del caudal máximo [58], [59]. Al integrar datos horarios, se logra capturar la variabilidad intra-evento, un factor crítico para modelar procesos dependientes de la energía cinética de la lluvia, como

la erosividad del suelo en los Andes y la respuesta hidrológica rápida en cuencas pequeñas [21], [41].

La histórica falta de información en cuencas no aforadas se está superando gracias a la madurez de los productos satelitales de precipitación (HRPP) como GPM-IMERG y GSMaP. Sin embargo, la discusión académica actual ya no se centra en la viabilidad de su uso, sino en las estrategias para minimizar sus errores. La evidencia sugiere que confiar en un único producto satelital conlleva riesgos debido a sesgos regionales y errores de detección en topografías complejas [28], [39]. En contraste, las estrategias de fusión de datos (data merging) y corrección de sesgo en tiempo casi real han demostrado beneficios superiores. Por ejemplo, estudios en la cuenca del Kinu (Japón) y en Arabia Saudita demuestran que la combinación de múltiples fuentes satelitales y reanálisis climáticos (como ERA5 o AORC) mejora sustancialmente la precisión operativa frente al uso de productos individuales, permitiendo reconstruir series históricas robustas para zonas sin instrumentación [22], [60], [61].

Uno de los hallazgos más notables de esta revisión es el desplazamiento progresivo de los modelos físicos tradicionales hacia soluciones basadas en Inteligencia Artificial (IA) para suplir la falta de parámetros físicos. Mientras que modelos como SWAT requieren una calibración compleja que es difícil de ejecutar sin datos de aforo [24], los enfoques de Machine Learning (ML) y Deep Learning (DL) ofrecen soluciones disruptivas. Por un lado, algoritmos como Random Forest han demostrado ser superiores a las regresiones lineales para la regionalización de parámetros, transfiriendo información de cuencas aforadas a no aforadas con mayor eficiencia [34]. Por otro lado, arquitecturas avanzadas como las redes neuronales de memoria a largo plazo (LSTM) y estructuras con capas ocultas bidimensionales logran aprender patrones espacio-temporales complejos de la lluvia horaria que los modelos conceptuales a menudo omiten, superando las limitaciones de rigidez de los enfoques físicos tradicionales [62], [63], [64].

La implementación de la resolución horaria habilita sistemas de nowcasting (pronóstico inmediato) vitales para la protección civil. La reconstrucción de eventos catastróficos, como el de Mandra (Grecia), evidencia que la simulación horaria es indispensable para anticipar la magnitud del desastre y emitir alertas tempranas efectivas [54]. No obstante, persisten desafíos importantes: la incertidumbre en las proyecciones de precipitación sub-diaria es alta y se propaga de forma no lineal en los modelos hidrológicos [65]. Además, la validación de estos modelos en cuencas totalmente desprovistas de datos sigue dependiendo de la hipótesis de similitud hidrológica, la cual puede presentar fallas en escenarios de cambio climático o cambios drásticos de uso de suelo [36], [66].

Asimismo, la efectividad de la resolución horaria no actúa de forma aislada, sino que depende intrínsecamente de la calidad de los datos fisiográficos y la evolución de los sensores remotos. Estudios sobre el escalamiento temporal demuestran que la estructura de la lluvia extrema a escalas de

minutos es determinante para la generación de escorrentía rápida [57], una dinámica que exige acoplarse con información detallada de suelos y cobertura terrestre para no comprometer la precisión del modelo en eventos de *flash flood* [67]. Esta sinergia se ha visto fortalecida por la transición de la era TRMM a GPM, donde la mayor frecuencia de muestreo satelital ha permitido refinar las simulaciones sub-diarias [68], habilitando incluso enfoques ecohidrológicos novedosos que utilizan variables satelitales (como la evapotranspiración) para calibrar modelos en cuencas sin ningún aforo físico [69]. Desde una perspectiva aplicada, esta alta resolución es el cimiento para establecer umbrales críticos de lluvia que detonen alertas tempranas en zonas montañosas [27] y para diseñar estrategias numéricas de mitigación en entornos urbanos densamente poblados, donde el tiempo de respuesta ante inundaciones es mínimo [70].

Aunque la heterogeneidad metodológica de los estudios seleccionados limita la ejecución de un meta-análisis estadístico estricto, la revisión transversal de los datos permite establecer un consenso cuantitativo sobre el rendimiento de los modelos. En los estudios evaluados, la transición de una resolución diaria a una horaria evidencia un incremento sistemático en el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), escalando de promedios de 0.40-0.50 en modelos diarios a valores superiores a 0.70 en modelos horarios con datos satelitales corregidos. Simultáneamente, el Error Relativo del Pico experimenta una reducción crítica, pasando de subestimaciones superiores al 40% (típicas de la agregación a 24 horas) a márgenes de error aceptables del 15% al 20%. Estas variaciones son aún más pronunciadas en zonas de topografía compleja y climas tropicales o monzónicos, donde la intensidad de las tormentas convectivas no puede ser capturada por escalas temporales gruesas.

A nivel práctico, los hallazgos de esta revisión sustentan la necesidad de establecer un nuevo marco de implementación para las entidades de gestión de riesgo en América Latina. Se propone que los futuros sistemas de alerta temprana en cuencas andinas y costeras no aforadas integren, por defecto, productos satelitales de alta frecuencia (como IMERG o GSMaP) acoplados a algoritmos de Machine Learning (como Random Forest) para la regionalización de parámetros físicos. Esta hibridación tecnológica permite trasladar el rigor de la modelización horaria a la práctica operativa, facilitando el establecimiento de umbrales críticos de lluvia y el diseño de obras de mitigación que respondan a la intensidad real de las avenidas repentinas contemporáneas.

V. CONCLUSIONES

La presente revisión sistemática permite concluir que la adopción de una resolución temporal horaria en la modelización hidrológica no constituye simplemente una mejora incremental en la calidad de los datos, sino que representa un cambio de paradigma indispensable para la gestión eficiente del riesgo de inundación en cuencas no aforadas.

En primer lugar, se ha determinado que la escala horaria es crítica para superar la subestimación sistemática de caudales máximos inherente al uso de registros diarios. La evidencia analizada demuestra que la agregación de la lluvia a intervalos de 24 horas enmascara la variabilidad de las tormentas convectivas de corta duración, impidiendo la correcta simulación de la rama ascendente del hidrograma y el tiempo al pico. Por el contrario, la resolución horaria logra capturar la intensidad real y la energía cinética de la precipitación, factores determinantes para reproducir fielmente eventos de inundación repentina (*flash floods*) en cuencas pequeñas, zonas urbanas y áreas de topografía compleja.

En segundo lugar, se confirma que la "ceguera" hidrológica en zonas desprovistas de instrumentación in situ está siendo superada eficazmente mediante el uso de productos de precipitación por satélite de alta resolución y reanálisis climáticos. Sin embargo, se concluye que la aplicación directa de estos productos no es recomendable debido a los sesgos regionales y errores de detección. La viabilidad operativa de estos datos depende intrínsecamente de la aplicación de técnicas avanzadas de corrección de sesgo y estrategias de fusión de datos, las cuales han demostrado incrementar sustancialmente la fiabilidad de las simulaciones.

En tercer lugar, se observa una evolución tecnológica clara desde los modelos físicos distribuidos tradicionales hacia enfoques híbridos y basados en inteligencia artificial. Los algoritmos de aprendizaje automático (Machine Learning) y aprendizaje profundo (Deep Learning) han mostrado una superioridad notable en la regionalización de parámetros y en la simulación de relaciones lluvia-escorrentía no lineales, ofreciendo soluciones robustas para reducir la incertidumbre predictiva en entornos donde la calibración física convencional es inviable.

Ante un contexto global de cambio climático que proyecta una intensificación en la frecuencia y magnitud de los eventos extremos, este estudio concluye que la modelización a escala horaria ha dejado de ser una opción técnica avanzada para convertirse en un requisito operativo esencial. Su implementación es imperativa para el diseño de infraestructuras resilientes y, fundamentalmente, para el desarrollo de sistemas de alerta temprana (*nowcasting*) capaces de salvaguardar vidas en regiones vulnerables y con escasez de datos.

El análisis de la literatura revela un patrón distintivo en la aplicación de algoritmos de inteligencia artificial según la disponibilidad de datos. En el contexto de cuencas no aforadas, los algoritmos de Machine Learning (ML) clásicos, particularmente Random Forest (RF) y árboles de decisión, se consolidan como la herramienta más eficaz para la regionalización de parámetros. Su robustez para procesar variables estáticas del paisaje (como tipo de suelo y pendiente) permite transferir información física desde cuencas vecinas con mayor precisión que las regresiones lineales tradicionales, facilitando la predicción de eventos extremos en zonas sin instrumentación [34], [35], [66].

Por el contrario, las arquitecturas de Deep Learning (DL), encabezadas por las redes LSTM (Long Short-Term Memory), demuestran una superioridad indiscutible en la simulación temporal de la relación lluvia-escorrentía. Debido a su capacidad de "memoria" para capturar retardos y no linealidades complejas, el DL se posiciona como el estándar para el pronóstico a corto plazo en cuencas aforadas o en esquemas híbridos que integran datos satelitales en zonas con escasa información, superando a los modelos físicos en el manejo del ruido de los datos de entrada [43], [62], [63]. En síntesis, mientras el ML resuelve la transferencia espacial de parámetros, el DL optimiza la dinámica temporal del flujo.

REFERENCIAS

- [1] M. Ghanbari *et al.*, "Compounding effects of changing sea level and rainfall regimes on pluvial flooding in New York City," *Natural Hazards*, vol. 120, no. 7, pp. 6377–6400, May 2024, doi: 10.1007/s11069-024-06466-8.
- [2] R. Louis, Y. Zech, A. Joseph, N. Gonomy, and S. Soares-Fraza, "Flood Modeling of the June 2023 Flooding of Léogâne City by the Overflow of the Rouyonne River in Haiti," *Water (Switzerland)*, vol. 16, no. 18, Sep. 2024, doi: 10.3390/w16182594.
- [3] W. T. de Vries and J. Shi, "Assessing Rainwater Risks and Rainwater Harvesting Opportunities for the New Capital City of Indonesia," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 22, Nov. 2024, doi: 10.3390/su16229999.
- [4] F. Cleophas *et al.*, "Hydrological Modelling of Rainfall-Runoff Dynamics in the Padas River Basin: Insights for Water Resources Management," *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, vol. 133, no. 1, pp. 191–201, Sep. 2025, doi: 10.37934/aram.133.1.191201.
- [5] R. Mínguez and S. Herrera, "Spatial extreme model for rainfall depth: application to the estimation of IDF curves in the Basque country," *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 37, no. 8, pp. 3117–3148, Aug. 2023, doi: 10.1007/s00477-023-02440-1.
- [6] H. El-Bagoury and A. Gad, "Integrated Hydrological Modeling for Watershed Analysis, Flood Prediction, and Mitigation Using Meteorological and Morphometric Data, SCS-CN, HEC-HMS/RAS, and QGIS," *Water (Switzerland)*, vol. 16, no. 2, Jan. 2024, doi: 10.3390/w16020356.
- [7] R. A. Lane, G. Coxon, J. Freer, J. Seibert, and T. Wagener, "A large-sample investigation into uncertain climate change impacts on high flows across Great Britain," *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 26, no. 21, pp. 5535–5554, Nov. 2022, doi: 10.5194/hess-26-5535-2022.
- [8] L. Sciuto, D. Vanella, G. L. Cirelli, S. Consoli, F. Licciardello, and G. Longo-Minnolo, "Improving runoff estimation in hydrological models using remote sensing and climate data reanalysis in the Dittaino River Basin (Eastern Sicily, Italy)," *J Hydrol Reg Stud*, vol. 60, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.ejrh.2025.102569.
- [9] H. Llauca, K. Leon, and W. Lavado-Casimiro, "Construction of a daily streamflow dataset for Peru using a similarity-based regionalization approach and a hybrid hydrological modeling framework," *J Hydrol Reg Stud*, vol. 47, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.ejrh.2023.101381.
- [10] A. Salih and A. Hassabla, "Flash Flood Risk Assessment in the Asir Region, Southwestern Saudi Arabia, Using a Physically-Based Distributed Hydrological Model and GPM IMERG Satellite Rainfall Data," *Atmosphere (Basel)*, vol. 15, no. 6, Jun. 2024, doi: 10.3390/atmos15060624.
- [11] W. Plata-Rocha, E. Avila-Aceves, S. A. Monjardin-Armenta, L. Y. Pérez-Aguilar, J. G. Rangel-Peraza, and Y. G. Zambrano-Medina, "Urban flood modeling using hydrograph and Rain-on-Grid approaches with HEC-HMS and HEC-RAS: A case study of the Culiacán River," *J South Am Earth Sci*, vol. 165, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.jsames.2025.105694.
- [12] H. X. Do, T. H. Le, M. H. Le, D. L. T. Nguyen, and N. C. Do, "Future Changes in Hydro-Climatic Extremes across Vietnam: Evidence from a Semi-Distributed Hydrological Model Forced by Downscaled CMIP6 Climate Data," *Water (Switzerland)*, vol. 16, no. 5, Mar. 2024, doi: 10.3390/w16050674.
- [13] B. M. Nieto, H. Asesor, I. E. Carlos, and G. Saez, "Estimación de la escorrentía directa utilizando el método SCS-CN para predecir la inundación en la cuenca sin registro hidrometeorológico de Ccayarpachi, Ayacucho, 2023," 2024.
- [14] S. K. Dwivedi *et al.*, "Unravelling flash flood dynamics of Song watershed, Doon Valley: key insights for floodplain management," *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 15, no. 1, 2024, doi: 10.1080/19475705.2024.2378979.
- [15] V. Heimhuber, J. C. Hannemann, and W. Rieger, "Flood risk management in remote and impoverished areas—a case study of Onaville, Haiti," *Water (Switzerland)*, vol. 7, no. 7, pp. 3832–3860, 2015, doi: 10.3390/w7073832.
- [16] J. H. Lee, G. M. Yuk, H. T. Moon, and Y. Il Moon, "Integrated flood forecasting and warning system against flash rainfall in the small-scaled urban stream," *Atmosphere (Basel)*, vol. 11, no. 9, Sep. 2020, doi: 10.3390/ATMOS11090971.
- [17] W. L.-C. and O. F.-O. A. Huerta, "High-resolution gridded hourly precipitation dataset for Peru (PISCOp_h)," *Data in Bries*, vol. 45, p. 108570, 2022, doi: 10.6084/m9.figshare.c.5743166.
- [18] Y. Cai, Y. Yang, Q. Tan, C. Dai, Z. Zhu, and X. Zhang, "Impacts of temporal/spatial rainfall heterogeneities on peak runoff distribution and intensities for an urban river basin of south China," *River*, vol. 3, no. 1, pp. 24–37, Feb. 2024, doi: 10.1002/rvr.2.77.
- [19] M. Beylich, U. Haberlandt, and F. Reinstorf, "Daily vs. hourly simulation for estimating future flood peaks in mesoscale catchments," *Hydrology Research*, vol. 52, no. 4, pp. 821–833, Aug. 2021, doi: 10.2166/nh.2021.152.
- [20] Z. Ren *et al.*, "Temporal Scaling Characteristics of Sub-Daily Precipitation in Qinghai-Tibet Plateau," *Earths Future*, vol. 12, no. 3, Mar. 2024, doi: 10.1029/2024EF004417.
- [21] D. Delgado, M. Sadaoui, W. Ludwig, and W. Méndez, "Spatio-temporal assessment of rainfall erosivity in Ecuador based on RUSLE using satellite-based high frequency GPM-IMERG precipitation data," *Catena (Amst)*, vol. 219, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.catena.2022.106597.
- [22] X. Wang *et al.*, "Saudi Rainfall (SaRa): Hourly 0.1° Gridded Rainfall (1979–Present) for Saudi Arabia via Machine Learning Fusion of Satellite and Model Data," Feb. 03, 2025, doi: 10.5194/egusphere-2025-254.
- [23] J. Shi *et al.*, "Are the latest GMSAP satellite precipitation products feasible for daily and hourly discharge simulations in the yellow river source region?," *Remote Sens (Basel)*, vol. 13, no. 21, Nov. 2021, doi: 10.3390/rs13214199.
- [24] L. Boithias *et al.*, "Simulating flash floods at hourly time-step using the SWAT model," *Water (Switzerland)*, vol. 9, no. 12, Nov. 2017, doi: 10.3390/w9120929.
- [25] A. M. Ali, M. Abdallah, B. Mohammadi, and H. E. Elzain, "Three-stage hybrid modeling for real-time streamflow prediction in data-scarce regions," *J Hydrol Reg Stud*, vol. 59, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.ejrh.2025.102337.
- [26] X. Tang, Z. Yin, G. Qin, L. Guo, and H. Li, "Integration of satellite precipitation data and deep learning for improving flash flood simulation in a poor-gauged mountainous catchment," *Remote Sens (Basel)*, vol. 13, no. 24, Dec. 2021, doi: 10.3390/rs13245083.
- [27] Q. Miao, D. Yang, H. Yang, and Z. Li, "Establishing a rainfall threshold for flash flood warnings in China's mountainous areas based on a distributed hydrological model," *J Hydrol (Amst)*, vol. 541, pp. 371–386, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.04.054.
- [28] J. Su, X. Li, W. Ren, H. Lü, and D. Zheng, "How reliable are the satellite-based precipitation estimations in guiding hydrological modelling in South China?," *J Hydrol (Amst)*, vol. 602, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126705.
- [29] M. J. Page *et al.*, "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," Mar. 29, 2021, *BMJ Publishing Group*. doi: 10.1136/bmj.n71.
- [30] L. Benoit *et al.*, "High Space-Time Resolution Observation of Extreme Orographic Rain Gradients in a Pacific Island Catchment," *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 8, Jan. 2021, doi: 10.3389/feart.2020.546246.

- [31] Z. Zhu, D. B. Wright, and G. Yu, "The Impact of Rainfall Space-Time Structure in Flood Frequency Analysis," *Water Resour Res*, vol. 54, no. 11, pp. 8983–8998, Nov. 2018, doi: 10.1029/2018WR023550.
- [32] X. Lyu, Z. Li, and X. Li, "Evaluation of GPM IMERG Satellite Precipitation Products in Event-Based Flood Modeling over the Sunshui River Basin in Southwestern China," *Remote Sens (Basel)*, vol. 16, no. 13, Jul. 2024, doi: 10.3390/rs16132333.
- [33] E. Rodríguez, C. García-Echeverri, A. González, J. Sandoval, M. Patarroyo-González, and D. E. Agudelo-Duque, "Evaluating the IMERG precipitation satellite product to derive intensity-duration-frequency curves in Colombia," *Revista Facultad de Ingeniería*, no. 110, pp. 31–47, 2024, doi: 10.17533/UDEA.REDIN.20230212.
- [34] M. Saadi, L. Oudin, and P. Ribstein, "Random forest ability in regionalizing hourly hydrological model parameters," *Water (Switzerland)*, vol. 11, no. 8, 2019, doi: 10.3390/w11081540.
- [35] S. Raggetti, J. Zhou, H. Wang, C. Liu, and L. Guo, "Modeling flash floods in ungauged mountain catchments of China: A decision tree learning approach for parameter regionalization," *J Hydrol (Amst)*, vol. 555, pp. 330–346, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.10.031.
- [36] V. Budamala, A. Wadhwa, R. Das Bhowmik, A. Mahindrakar, R. Satyaji Rao Yellamelli, and K. S. Kasiviswanathan, "Multi-temporal downscaling of daily to sub-daily streamflow for flash flood watersheds at ungauged stations using a hybrid framework," *J Hydrol (Amst)*, vol. 625, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.130110.
- [37] H. Liu *et al.*, "Performance of datasets in hydrological simulation in various basin scales : An investigation on hydrological lumped effect in the Lancang-Mekong region," *J Hydrol Reg Stud*, vol. 62, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.ejrh.2025.102769.
- [38] P. Ji, X. Yuan, Y. Jiao, and M. Zhang, "On the reliability of 12 high-resolution precipitation products for process-based hydrological modeling in China," *J Hydrol (Amst)*, vol. 628, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.130598.
- [39] M. Sapountzis, A. Kastridis, A. P. Kazamias, A. Karagiannidis, P. Nikopoulos, and K. Lagouvardos, "Utilization and uncertainties of satellite precipitation data in flash flood hydrological analysis in ungauged watersheds," *Global Nest Journal*, vol. 23, no. 3, pp. 388–399, Nov. 2021, doi: 10.30955/GNJ.003905.
- [40] W. Qi, C. Zhang, G. Fu, C. Sweetapple, and H. Zhou, "Evaluation of global fine-resolution precipitation products and their uncertainty quantification in ensemble discharge simulations," *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 20, no. 2, pp. 903–920, Feb. 2016, doi: 10.5194/hess-20-903-2016.
- [41] A. T. Tsegaw, K. Alfredsen, T. Skaugen, and T. M. Muthanna, "Predicting hourly flows at ungauged small rural catchments using a parsimonious hydrological model," *J Hydrol (Amst)*, vol. 573, pp. 855–871, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.03.090.
- [42] U. Rasool *et al.*, "Quantifying pluvial flood simulation in ungauged urban area; A case study of 2022 unprecedented pluvial flood in Karachi, Pakistan," *J Hydrol (Amst)*, vol. 655, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.jhydrol.2025.132905.
- [43] S. Grimaldi *et al.*, "Continuous hydrologic modelling for small and ungauged basins: A comparison of eight rainfall models for sub-daily runoff simulations," *J Hydrol (Amst)*, vol. 610, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.127866.
- [44] P. A. Garambois, K. Larnier, H. Roux, D. Labat, and D. Dartus, "Analysis of flash flood-triggering rainfall for a process-oriented hydrological model," *Atmos Res*, vol. 137, pp. 14–24, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.atmosres.2013.09.016.
- [45] T. Rosin, F. Marra, and E. Morin, "Exploring patterns in precipitation intensity-duration-area-frequency relationships using weather radar data," *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 28, no. 15, pp. 3549–3566, Aug. 2024, doi: 10.5194/hess-28-3549-2024.
- [46] Y. Yuan, T. Chen, T. Ao, and K. Yang, "Flood Simulation Study of China's Data-Deficient Mountainous Watersheds Based on CMPA-Hourly," *Atmosphere (Basel)*, vol. 14, no. 11, Nov. 2023, doi: 10.3390/atmos14111666.
- [47] D. Yu *et al.*, "Improvement of the SWAT model for event-based flood simulation on a sub-daily timescale," *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 22, no. 9, pp. 5001–5019, Sep. 2018, doi: 10.5194/hess-22-5001-2018.
- [48] A. Kumar, S. Biswas, S. Rallapalli, P. Shashwat, S. Balaji, and R. Gupta, "Micro-macro-scale flood modeling in ungauged channels: Rain-on-grid approach for improving prediction accuracy with varied resolution datasets," *J Hydrol (Amst)*, vol. 654, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.jhydrol.2025.132862.
- [49] H. Ampas, I. Refanidis, and V. Ampas, "Hybrid Hydrological Forecasting Through a Physical Model and a Weather-Informed Transformer Model: A Case Study in Greek Watershed," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 12, Jun. 2025, doi: 10.3390/app15126679.
- [50] A. Jodar-Abellan, J. Valdes-Abellan, C. Pla, and F. Gomariz-Castillo, "Impact of land use changes on flash flood prediction using a sub-daily SWAT model in five Mediterranean ungauged watersheds (SE Spain)," *Science of the Total Environment*, vol. 657, pp. 1578–1591, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.034.
- [51] M. Girona-Mata *et al.*, "Probabilistic precipitation downscaling for ungauged mountain sites: A pilot study for the Hindu Kush Himalaya," *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 29, no. 14, pp. 3073–3100, Jul. 2025, doi: 10.5194/hess-29-3073-2025.
- [52] P. Ponukumati, A. Mohammed, and S. Regonda, "Insights on Satellite-Based IMERG Precipitation Estimates at Multiple Space and Time Scales for a Developing Urban Region in India", doi: 10.1175/JHM-D-22.
- [53] Q. Zhu, D. Zhou, Y. Luo, Y. P. Xu, G. Wang, and X. Gao, "Suitability of high-temporal satellite-based precipitation products in flood simulation over a humid region of China," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 66, no. 1, pp. 104–117, 2021, doi: 10.1080/02626667.2020.1844206.
- [54] C. Spyrou *et al.*, "Implementation of a nowcasting hydrometeorological system for studying flash flood events: The Case of Mandra, Greece," *Remote Sens (Basel)*, vol. 12, no. 17, Sep. 2020, doi: 10.3390/RS12172784.
- [55] T. Darras, V. Borrell Estupina, L. Kong-A-Siou, B. Vayssade, A. Johannet, and S. Pistre, "Identification of spatial and temporal contributions of rainfalls to flash floods using neural network modelling: Case study on the Lez basin (southern France)," *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 19, no. 10, pp. 4397–4410, Oct. 2015, doi: 10.5194/hess-19-4397-2015.
- [56] S. Setti, K. Yumnam, M. Rathinasamy, and A. Agarwal, "Assessment of satellite precipitation products at different time scales over a cyclone prone coastal river basin in India," *Journal of Water and Climate Change*, vol. 14, no. 1, pp. 38–65, Jan. 2023, doi: 10.2166/wcc.2022.166.
- [57] J. M. Pöschmann, D. Kim, R. Kronenberg, and C. Bernhofer, "An analysis of temporal scaling behaviour of extreme rainfall in Germany based on radar precipitation QPE data," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 21, no. 4, pp. 1195–1207, Apr. 2021, doi: 10.5194/nhess-21-1195-2021.
- [58] Z. Zhu, Y. Yang, Y. Cai, and Z. Yang, "Urban flood analysis in ungauged drainage basin using short-term and high-resolution remotely sensed rainfall records," *Remote Sens (Basel)*, vol. 13, no. 11, Jun. 2021, doi: 10.3390/rs13112204.
- [59] X. Zhai, Y. Zhang, Y. Zhang, L. Guo, and R. Liu, "Simulating flash flood hydrographs and behavior metrics across China: Implications for flash flood management," *Science of the Total Environment*, vol. 763, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142977.
- [60] G. R. Ghimire, S.-C. Kao, and S. Gangrade, "Enhancing Streamflow Reanalysis Across the Conterminous US Leveraging Multiple Gridded Precipitation Data Sets," 2025, doi: 10.13139/OLCF/2222888.
- [61] N. Mastrantonas, B. Bhattacharya, Y. Shibuo, M. Rasmy, G. Espinoza-Dávalos, and D. Solomatine, "Evaluating the benefits of merging near-real-time satellite precipitation products: A case study in the Kinu basin region, Japan," *J Hydrometeorol*, vol. 20, no. 6, pp. 1213–1233, 2019, doi: 10.1175/JHM-D-18-0190.1.
- [62] S. S. Refadah, "Development in flood forecasting: A comprehensive review of complex and machine learning models," *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 139, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.pce.2025.103975.
- [63] M. Asif, M. M. Kuglitsch, I. Pelivan, and R. Albano, "Review and Intercomparison of Machine Learning Applications for Short-term Flood Forecasting," *Water Resources Management*, vol. 39, no. 5, pp. 1971–1991, Mar. 2025, doi: 10.1007/s11269-025-04093-x.
- [64] Y. yang Wang, W. chuan Wang, D. mei Xu, Y. wei Zhao, and H. fei Zang, "A novel strategy for flood flow Prediction: Integrating Spatio-Temporal information through a Two-Dimensional hidden layer

- structure,” *J Hydrol (Amst)*, vol. 638, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.jhydrol.2024.131482.
- [65] A. Majhi, C. T. Dhanya, and S. Chakma, “Quantification of model uncertainty in sub-daily extreme precipitation projections,” *Glob Planet Change*, vol. 218, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.gloplacha.2022.103967.
- [66] Z. Rasheed, A. Aravamudan, X. Zhang, G. C. Anagnostopoulos, and E. I. Nikolopoulos, “Combining global precipitation data and machine learning to predict flood peaks in ungauged areas with similar climate,” *Adv Water Resour*, vol. 192, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.advwatres.2024.104781.
- [67] A. Lovat, B. Vincendon, and V. Ducrocq, “Assessing the impact of resolution and soil datasets on flash-flood modelling,” *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 23, no. 3, pp. 1801–1818, Apr. 2019, doi: 10.5194/hess-23-1801-2019.
- [68] F. Yuan *et al.*, “Applications of TRMM- and GPM-era multiple- satellite precipitation products for flood simulations at sub-daily scales in a sparsely gauged watershed in Myanmar,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 11, no. 2, Jan. 2019, doi: 10.3390/rs11020140.
- [69] J. Choi, U. Kim, and S. Kim, “Ecohydrologic model with satellite-based data for predicting streamflow in ungauged basins,” *Science of the Total Environment*, vol. 903, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.166617.
- [70] Z. Cheng, K. P. Georgakakos, C. R. Spencer, and R. Banks, “Numerical Modeling of Flash Flood Risk Mitigation and Operational Warning in Urban Areas,” *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 16, Aug. 2022, doi: 10.3390/w14162494.