OPEN ACCESS

ARTÍCULO ORIGINAL

UNAH UNIVERSIDAD AGRARIA DE LA HABANA

Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias 35
enero-diciembre 2026
ISSN 1010-2760, eISSN 2071-0054
Cu-ID: https://cu-id.com/2177/v35e16

Análisis de las Cuencas Sis e Icán en Guatemala: Recomendaciones para la Prevención de Desastres

Analysis of the Sis and Icán Basins in Guatemala: Recommendations for Disaster Prevention

Tomás Antonio Padilla Cámbara[1*], Pedro Alejandro Soto Reyes[1], Jorge Luis Azzari Domínguez[1] and Oscar Brown Manrique[2]

[1]*Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad de Guatemala, Guatemala.*
[2]*Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Ciego de Ávila, Cuba. E-mail: obrown@unica.cu*

[*]Autor para correspondencia: Tomás Antonio Padilla Cámbara, e-mail: tpadillacambara@hotmail.com

RESUMEN: Guatemala, por su ubicación geográfica y eventos extremos recurrentes, enfrenta riesgos naturales significativos, siendo las inundaciones una amenaza histórica. El objetivo de este estudio es analizar las características hidrológicas de la cuenca de los ríos Sis e Icán, empleando enfoques cualitativos y cuantitativos. La investigación integra datos climáticos y de caudales con modelado hidráulico y análisis estocástico. Se recopilaron datos meteorológicos de estaciones como INSIVUMEH y ANACAFE, utilizando el software HEC-RAS para modelar hidráulicamente la cuenca. Entre los resultados, se destaca la identificación de áreas vulnerables, obtenida mediante la modelación que consideró escenarios de retorno y resultó en una zonificación final basada en caudales extremos. El enfoque integral revela detalles clave: el área total de la cuenca es de 929,89 km², con un perímetro de 156,49 km; las pendientes promedio oscilan entre 3% y 3,35%; la precipitación anual máxima fue de 5259,8 mm en 2021. La escorrentía superficial anual promedio es de 336 millones de m³ para el río Icán y 160 millones de m³ para el río Sis, sumando una disponibilidad hídrica potencial de aproximadamente 497 millones de m³ al año. Los resultados de la modelación de inundaciones señalan áreas propensas a inundaciones, mejorando la comprensión de los posibles impactos en la cuenca Sis-Icán.
Palabras clave: gestión de cuencas, modelación hidráulica, Sistemas de Información Geográfica.

ABSTRACT: Guatemala, due to its geographic location and recurring extreme events, faces significant natural risks, with flooding being a historical threat. The objective of this study is to analyze the hydrological characteristics of the Sis and Icán river basins, employing qualitative and quantitative approaches. The research integrates climate and flow data with hydraulic modeling and stochastic analysis. Meteorological data were collected from stations such as INSIVUMEH and ANACAFE, using HEC-RAS software to hydraulically model the basin. Among the results, the identification of vulnerable areas stands out, obtained through modeling that considered return scenarios and resulted in a final zoning based on extreme flows. The comprehensive approach reveals key details: the total basin area is 929.89 km², with a perimeter of 156.49 km; average slopes range between 3% and 3.35%; The maximum annual rainfall was 5259.8 mm in 2021. The average annual surface runoff is 336 million m³ for the Icán River and 160 million m³ for the Sis River, totaling a potential water availability of approximately 497 million m³ per year. Flood modeling results indicate flood-prone areas, improving the understanding of potential impacts on the Sis-Icán basin.
Keywords: hydraulic modeling, Geographic Information Systems, watershed management.

INTRODUCCIÓN

La realización de investigaciones hidrológicas es esencial para el crecimiento de una comunidad, una región o incluso un país. Estos estudios permiten entender el comportamiento del agua en una zona determinada, su distribución en la región y la disponibilidad que tiene para las diferentes partes interesadas o para el uso en sectores específicos del área. Así mismo, contribuye en la planificación, diseño, construcción y operación de un proyecto (Rivera *et al.*, 2021).

Dicho avance debe asegurar la sostenibilidad y la preservación del medio ambiente, con especial atención en la protección del agua y la implementación de estrategias para el diseño y el ordenamiento territorial. La mejora de los recursos hídricos es un requisito fundamental para lograr una planificación civil sostenible (Machacuay y Lozano, 2025).

Recibido: 30/11/2025
Aceptado: 28/03/2026
Conflictos de interés: Los autores declaran que no existen conflictos de interés.
Contribución de los autores: Conceptualización: Pedro Alejandro Soto Reyes, Jorge Luis Azzari Dominguez. **Curación de datos:** Pedro Alejandro Soto Reyes, Jorge Luis Azzari Dominguez. **Investigación:** Tomás Antonio Padilla Cámbara, Pedro Alejandro Soto Reyes, Jorge Luis Azzari Dominguez. **Metodología:** Tomás Antonio Padilla Cámbara. **Supervisión:** Tomás Antonio Padilla Cámbara. **Validación:** Jorge Luis Azzari Dominguez. **Redacción - borrador original:** Pedro Alejandro Soto Reyes, Jorge Luis Azzari Dominguez. **Redacción - revisión y edición:** Pedro Alejandro Soto Reyes, Jorge Luis Azzari Dominguez, Tomás Antonio Padilla Cámbara, Oscar Brown Manrique.
La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor

Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).
https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/

De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), el cambio climático se define como una modificación del clima causada directa o indirectamente por las actividades humanas, que altera la composición de la atmósfera global y se suma a la variabilidad natural del ambiente en un período de tiempo comparable. Este fenómeno incrementa la probabilidad de eventos climáticos extremos, tales como precipitaciones intensas que pueden causar inundaciones, deslizamientos de tierra, huracanes y ciclones; así como aumentos en la temperatura, incremento del nivel del mar y disminución de las fuentes de agua dulce (Gallo y Sánchez, 2021; Suazo y Torres, 2021). En tiempos actuales constituye un tema preocupante para la gobernanza de cualquier nación y es abordado por la comunidad científica como una de las tendencias de la sociedad postmoderna (Bósio y Rodrigues de Oliveira 2023).

Guatemala es un país del istmo centroamericano, de región climática tropical, en donde las amenazas de índole hidrometeorológico son recurrentes con impactos significativos sobre el mismo. El índice global de riesgo en el 2017 ubica al país en el noveno lugar en relación a los impactos socio-económicos, derivado de un desastre natural según Cabrales y López (2023); por lo que promover el cuidado de los ecosistemas y la protección ante los desastres naturales constituye uno de los objetivos del Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe (De Miguel y Sánchez, 2023).

El estudio toma como área de estudio la cuenca de los ríos Sis-Icán, ya que esta cuenca posee las condiciones para desarrollar un análisis hidrológico mediante la modelación de inundaciones, la cual ayuda a identificar zonas sensibles y permite una gestión eficaz del riesgo de inundación y estrategias de mitigación. Esta herramienta apoya la toma de decisiones al proporcionar información valiosa sobre los impactos potenciales de las inundaciones (Vallejo *et al.*, 2024).

Dentro de la cuenca de los ríos Sis e Icán hay una creciente necesidad tanto de elaborar un estudio que dictamine el comportamiento de sus ríos; así como promover un programa de manejo de la cuenca para disminuir el riesgo de contaminación y reducir las inundaciones en la parte baja. El objetivo de este estudio es analizar las características hidrológicas de la cuenca de los ríos Sis e Icán para la modelación de inundaciones que permita la localización de las zonas con amenazas a inundaciones a partir de un análisis integral de las características biofísicas, climáticas y morfométricas en la zona de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto cualitativo y cuantitativo, con un diseño no experimental y correlacional para abordar la complejidad de la cuenca (García *et al.*, 2021). El estudio combinó análisis longitudinales para evaluar la variabilidad temporal de las variables hidrológicas y un componente descriptivo-diagnóstico para caracterizar el estado actual de la cuenca y sus amenazas de inundación, integrando información primaria y secundaria mediante Sistemas de Información Geográfica.

Área de estudio

La investigación se desarrolló en la cuenca de los ríos Sis e Icán, ubicada en el suroccidente de Guatemala. El río Icán es un río costero que nace en la Sierra Madre, en las laderas del volcán de Santo Tomás (Suchitepéquez), y desemboca en el océano Pacífico. Discurre de forma paralela al río Sis también en Suchitepéquez, el cual conecta con los ríos Sis Chiquito y Se, antes de desembocar en el río Icán. La cuenca del río Sis-Icán abarca una superficie total de 919 km².

Recopilación de datos

Se recopiló información meteorológica, hidrométrica y espacial de diversas fuentes institucionales y de campo:

- Datos meteorológicos: se obtuvieron registros diarios y mensuales de precipitación, evaporación de tanque, temperatura y humedad relativa de las siguientes estaciones: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) "Estación Mazatenango"; Asociación Nacional del Café (ANACAFE) "Estación Buena Vista"; Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC) "Estaciones Tululá, Lorena, Naranjales, San Nicolás y Providencia".
- Datos hidrométricos: se adquirieron series de caudales de las estaciones hidrométricas La Franja y La Máquina (INSIVUMEH). Esta información se complementó con datos del ICC y con análisis de crecidas regionales.
- Datos espaciales y de campo: se utilizaron modelos de elevación digital, imágenes satelitales (*Google Satellite*); así como mapas geológicos y geomorfológicos existentes. El trabajo de campo fue fundamental para verificar *in situ* la cobertura vegetal, los usos del suelo, las características geomorfológicas y las condiciones hidrológicas; también para calibrar la información obtenida en gabinete.

Instrumentos y software

Para el procesamiento y análisis de la información se emplearon las siguientes herramientas:

- Estaciones de monitoreo: Estaciones meteorológicas e hidrométricas de INSIVUMEH, ANACAFE e ICC para la adquisición de datos primarios.
- Software de modelación hidráulica: Se utilizó el software HEC-RAS, junto con su complemento RAS Mapper, para simular el comportamiento hidráulico de los ríos y delimitar las áreas de inundación.

- Sistema de Información Geográfica (SIG): Se empleó ArcGIS para la gestión, análisis y representación espacial de la información, incluyendo la creación de mapas temáticos de cobertura, usos del suelo, pendientes, geología y la zonificación final de áreas inundables.
- Herramientas analíticas: Se utilizaron hojas de cálculo y software estadístico para realizar los cálculos hidrológicos, estocásticos y de balance hídrico.

Caracterización biofísica y morfométrica de la cuenca

La caracterización biofísica y morfométrica de la cuenca se realizó de forma detallada a partir de trabajo de campo y el análisis espacial con ArcGIS (Cobeña *et al.*, 2023). Esto incluyó:

- Levantamiento del relieve y verificación geológica: para el mapeo de las características abióticas.
- Análisis morfométrico: se calcularon parámetros como área total, perímetro, longitud del río principal, clasificación de drenaje, altitudes y pendientes promedio, siguiendo el método de Horton.
- Análisis geomorfológico: se realizó mediante la comparación de fotografías satelitales históricas para identificar cambios en la morfología de la cuenca.

Caracterización climatológica e hidrológica

Para caracterizar el régimen hidroclimático de la cuenca y cuantificar la disponibilidad del recurso hídrico, se realizaron los siguientes análisis:

- Comportamiento de las variables climáticas: se analizaron las variables climáticas precipitación y temperatura, segmentando la cuenca en partes alta, media y baja, contextualizándola con información de la cuenca vecina del río Nahualate.
- Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF): se utilizaron para describir el comportamiento probabilístico de la precipitación, utilizando los datos de la estación Mazatenango como base.
- Análisis de escorrentía superficial: se utilizó la metodología de Villón (2024) a partir de datos de las estaciones hidrométricas La Franja y La Máquina para calcular caudales y analizar el comportamiento de la escorrentía en diferentes segmentos de la red de drenaje.
- Balance hídrico: se aplicó la metodología de Schosinsky para estimar el balance hídrico de la cuenca.

Análisis estadístico y estocástico de caudales extremos

Con el propósito de determinar caudales de diseño para distintos escenarios de retorno y evaluar la probabilidad de eventos hidrológicos extremos, se desarrolló un análisis estadístico y estocástico de caudales máximos mediante los siguientes procedimientos:

- Estimación de caudales máximos: se utilizó el método de la Conservación de Suelos (SCS) para el cálculo de caudales máximos Lozano y Valeriano (2022), considerando las clasificaciones de suelo y condiciones hidrológicas observadas en campo.
- Análisis de frecuencias: se realizó un análisis estocástico de los caudales máximos diarios para un año hidrológico completo, generando curvas de frecuencia. Para el cálculo de caudales máximos de diseño con períodos de retorno de 50 y 100 años, se aplicaron las distribuciones de probabilidad de Pearson Tipo III y Gumbel, utilizando los datos históricos de las estaciones hidrométricas.

Modelación hidráulica y zonificación de inundaciones

Para evaluar el comportamiento hidráulico de los cauces ante eventos extremos y delimitar las zonas susceptibles a inundación en la cuenca, se desarrolló una modelación hidráulica con HEC-RAS Vallejo *et al.* (2024) y posterior zonificación en ArcGIS, considerando los siguientes aspectos:

- Configuración del modelo: se construyó un modelo hidráulico de flujo permanente para tres segmentos clave: el río Sis, el río Icán y su confluencia en el estero. Se utilizó HEC-RAS con datos de: perfiles transversales del cauce, derivados de la topografía y el modelo de elevación digital; coeficientes de rugosidad de Manning para cada tramo, basados en observaciones de campo y la digitalización de imágenes satelitales (Google Satellite) y como condiciones de frontera se introdujeron los caudales máximos estimados para los diferentes escenarios (período 2003-2022, y períodos de retorno de 50 y 100 años).
- Simulación y zonificación: la simulación hidráulica permitió determinar los mapas de inundación para cada escenario. Estos resultados se exportaron a ArcGIS, donde se integraron con información geológica y geomorfológica para generar un mapa de zonificación de áreas inundables. Este mapa se comparó y validó con la cartografía de amenaza de inundación del Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de las características biofísicas y morfométricas de la cuenca

El estudio de aspectos biofísicos identificó tres rangos de relieve en la cuenca de los ríos Sis-Icán: 25-50 %, 12-25 % y 0-12 %. Las pendientes más pronunciadas (25-50 %), ubicadas en la parte alta, comprenden 4,48 km²,

equivalentes al 0,48 % del área total. La red de drenaje se subdivide en las subcuencas de los ríos Icán, Sis, Nimá y Seco, que confluyen en el estero El Tulate al sur. Geológicamente, predominan formaciones volcánicas y depósitos aluviales (Qa), típicos de la vertiente del Pacífico guatemalteco.

El análisis edafológico, basado en estudios previos, identificó ocho series de suelo, siendo la serie Ixtán (Ix) la más representativa. Este suelo presenta textura franca, baja pedregosidad, buen drenaje, alta fertilidad y un importante componente mineralógico, condiciones que potencian la productividad agrícola. En coherencia con estas características, los usos del suelo reflejan una intensa interacción antrópica: la agricultura anual, el pastoreo y el cultivo de hule abarcan aproximadamente el 70 % de la cuenca, destacando las plantaciones de caña de azúcar, emblemáticas de la costa sur de Guatemala (Vásquez *et al.*, 2025).

En términos geomorfológicos, se identificaron planicies, rellenos, llanuras y abanicos aluviales. Estas unidades están vinculadas a superficies de deposición, modeladas por la acción fluvial y eólica. La parte Norte, dominada por el volcán Santo Tomás y sus laderas de material volcánico, añade complejidad al paisaje, mientras que en la desembocadura hacia el Pacífico se desarrolla una zona de marisma. Esta configuración geomorfológica, caracterizada por su naturaleza aluvial, es común en las cuencas del Pacífico, donde el transporte fluvial desde las tierras altas genera acumulaciones hídricas en extensas superficies de las partes media y baja (García *et al.*, 2021).

Análisis morfométrico

El análisis morfométrico determinó que la cuenca Sis-Icán posee un área total de 929,89 km² y un perímetro de 156,49 km (Sandoval y Rodríguez, 2021). La altitud media y la pendiente promedio de la cuenca se calcularon en 3,35 %, indicando un relieve predominantemente suave. Un análisis comparativo con la cuenca vecina del río Ocosito revela contrastes significativos en su comportamiento hidrológico. Mientras que la cuenca del Ocosito presenta un factor de forma de 4,34 (clasificada como redondeada), lo que implica una respuesta hidrológica rápida con caudales elevados en periodos cortos, la cuenca Sis-Icán exhibe un factor de forma de 0,15. Este valor tan bajo es característico de una morfología alargada, que propicia escurrimientos predominantemente paralelos y una respuesta hidrológica más moderada, con caudales de salida más prolongados en el tiempo (Moretto y Gentili, 2024).

En cuanto a la densidad de drenaje, la cuenca Sis-Icán presenta un valor bajo (0,60 km/km²), similar al de la cuenca del Ocosito. Esta similitud se atribuye a la naturaleza del material de composición, típico de áreas costeras con alta capacidad de infiltración y permeabilidad primaria (Villón, 2024). La baja pendiente media de la cuenca (3 %) limita la capacidad de avenamiento y la velocidad de la recepción superficial del agua.

Por otra parte, el análisis de los cambios geomorfológicos en el río Icán evidencia un desplazamiento significativo de su bocabarra y una reducción en su sección de apertura, atribuibles a procesos de sedimentación. Esta dinámica contrasta con la estabilidad observada en la bocabarra del Estero Tulate, un aspecto clave para la gestión de la desembocadura.

Análisis climatológico e hidrológico

El análisis climatológico reveló un marcado gradiente de precipitación a lo largo de la cuenca. En la parte alta, la precipitación anual máxima fue de 5259,8 mm (año 2021) y la mínima de 2821,4 mm (año 2018), con un promedio anual de 397,3 mm y máximos en junio. La zona media registró un pico excepcional de 6313,0 mm en 2010, asociado a la tormenta tropical Agatha. En la parte baja, los máximos alcanzaron 1100,4 mm (2021) y los mínimos 856,8 mm (2018). La temperatura media anual mostró poca variación: 26,1 °C en la parte alta, 25,8 °C en la media y 27,4 °C en la baja. En todas las zonas, la precipitación superó a la evapotranspiración, generando excedentes hídricos anuales (Maldonado *et al.*, 2021).

Al comparar estos resultados con la cuenca adyacente del río Nahualate, se observan patrones consistentes. La precipitación en la parte media o bocacosta del Nahualate (hasta 3000 mm anuales) es similar a la de la zona media de la Sis-Icán (3661 mm anuales). De igual forma, en la parte baja, los rangos son comparables (500-1000 mm en Nahualate y 972 mm en Sis-Icán). Esta similitud sugiere que el comportamiento climático responde a factores regionales, como el choque de vientos del Pacífico y del Norte, que generan puntos de condensación y recarga fluvial en las partes altas y medias de ambas cuencas (Rodríguez *et al.*, 2023).

Análisis de la escorrentía superficial y la oferta hídrica

El análisis de escorrentía superficial, basado en los registros (2003-2022) de las estaciones hidrométricas, muestra la transición de ríos caudalosos desde la parte alta hacia la baja. La estación La Franja (parte media) registró un caudal máximo de 6230,29 m³/s en el periodo 2010-2011 y un mínimo de 1956,35 m³/s en 2004-2005. Por su parte, la estación La Máquina (parte media-baja) reportó un máximo de 4886,56 m³/s en 2005-2006 y un mínimo de 789,12 m³/s en 2017-2018.

A partir de estos datos, se calculó una oferta hídrica superficial promedio de 506 millones de m³/año para el conjunto de la cuenca. Sin embargo, los cálculos específicos de esta investigación, que integran análisis más detallados de escorrentía, precisan esta cifra en 497 millones de m³/año. Esta oferta se distribuye en 336 millones de m³/año para el río Icán y 160 millones de m³/año para el río Sis.

Profundizando en la discrepancia con datos de INSIVUMEH: Al contrastar estos valores con la oferta hídrica de 30053 millones de m³/año, reportado por INSIVUMEH para toda la vertiente del Pacífico, surge una discrepancia sustancial. Esta diferencia,

más que una contradicción, obedece a escalas de análisis distintas. Mientras que el dato de INSIVUMEH integra la totalidad de las cuencas que drenan al Pacífico (un área mucho mayor), el presente estudio se circunscribe a la microescala de la cuenca Sis-Icán. La comparación, por tanto, subraya la importancia de utilizar datos a la escala adecuada para la gestión local del recurso y evita extrapolaciones que podrían llevar a una sobreestimación de la disponibilidad hídrica en un territorio específico (Moran *et al.*, 2024).

En cuanto a los caudales, el valor promedio histórico reportado para la cuenca es de 33,74 m³/s (Olivet y Tobar, 2023). No obstante, los registros más recientes de esta investigación indican una variabilidad que sitúa el caudal promedio actual en 15,75 m³/s. Esta diferencia se explica por la inclusión en la serie histórica de años con anomalías estacionales y periodos de menor precipitación, lo que impacta directamente en la representatividad del caudal medio. Para la gestión del riesgo, se determinó un caudal máximo de diseño de 188,51 m³/s para un período de retorno de 100 años, un valor de referencia crucial para la planificación de infraestructura y la delimitación de zonas de amenaza.

Análisis del balance hídrico

La aplicación de la metodología de Schosinsky permitió cuantificar el balance hídrico por zonas (Tabla 1). Los resultados muestran una notable capacidad de generación de recurso hídrico, aunque con marcadas diferencias entre las partes de la cuenca.

En la parte alta, los suelos Suchitepéquez y Samayac (francos limosos, con alta capacidad de infiltración de 412 mm/día) y una profundidad radicular promedio de 1500 mm (bosques y café) favorecen una escorrentía superficial de 1416,87 mm/año (40 % de la precipitación) y una recarga potencial de 425,73 mm/año (12 %). Estos valores, considerados de moderados a altos, confirman a esta zona como un área clave de recarga hídrica (Saldaña *et al.*, 2023).

La parte media, dominada por suelos Mazatenango y Cuyotenango (francos limosos, infiltración de 320 mm/día) y el cultivo de caña de azúcar (raíces de 1300 mm), presenta la mayor generación de escorrentía superficial con 1810,04 mm/año; representando el 44 % de la de la precipitación total (PP) y la recarga potencial más alta de la cuenca (561,28 mm/año; 14 %). Este máximo local en la recarga se atribuye a una combinación favorable de factores: una precipitación aún abundante, suelos con buena permeabilidad y una topografía que, aunque menos pronunciada que en la parte alta, facilita la infiltración antes de que el agua se concentre en los cauces.

En la parte baja, el suelo Ixtán (textura arcillosa, infiltración de 245 mm/día) y los cultivos de maíz y frijol (raíces someras de 250 mm) limitan la infiltración. A esto se suma que la evapotranspiración potencial (1561,73 mm/año) supera a la precipitación (971,93 mm/año). Como resultado, la escorrentía superficial (337,52 mm/año; 35 % de la PP) y la recarga potencial (270,12 mm/año; 17 %) son numéricamente menores. A pesar de ello, por su extensión y características de relieve, esta zona provee una reserva hídrica importante, tanto superficial como subterránea, que sostiene ecosistemas y actividades productivas.

En términos globales, la cuenca Sis-Icán genera un total de 3564,43 mm/año de escorrentía superficial y una capacidad de 1257,13 mm/año de recarga potencial, confirmando su importancia como reservorio y regulador hídrico en la vertiente del Pacífico.

Análisis de la modelación hidráulica, zonificación de inundaciones y gestión del riesgo

La aplicación del modelo HEC-RAS permitió simular el desbordamiento de los ríos bajo escenarios de período de retorno de 50 y 100 años, utilizando las distribuciones de Pearson III y Gumbel para los caudales de entrada. La modelación confirmó que las pérdidas de energía en los tramos analizados se deben a las contracciones y expansiones del flujo, un fenómeno típico en cauces con geometría variable (Gutiérrez *et al.*, 2022). Ambas distribuciones de probabilidad demostraron ser confiables para predicciones a largo plazo, identificando consistentemente las áreas susceptibles a inundaciones en la parte media de los ríos Sis e Icán, así como en el estero El Tulate.

La zonificación final (Figura 1), producto de la integración de los mapas de inundación (para un caudal extremo de 928 m³/s) con la información geomorfológica y los usos del suelo, determinó que el 64 % del área total de la cuenca se clasifica como de amenaza alta de inundación, el 14,39 % como amenaza media y el 21,5 % como amenaza baja (Tabla 2). Este mapa de zonificación se validó cualitativamente mediante comparación con la cartografía de amenazas del IARNA, encontrando una buena correspondencia en las áreas de mayor peligro.

Tabla 1. Balance hídrico

Región	Suelos	Escorrentía superficial (mm/año)	% PP	Recarga potencial (mm/año)	% PP
Alta	Suchitepéquez, Samayac	1416.87	40%	425.73	12%
Media	Mazatenango, Cuyotenango	1810.04	44%	561.28	14%
Baja	Ixtán	337.52	35%	270.12	17%

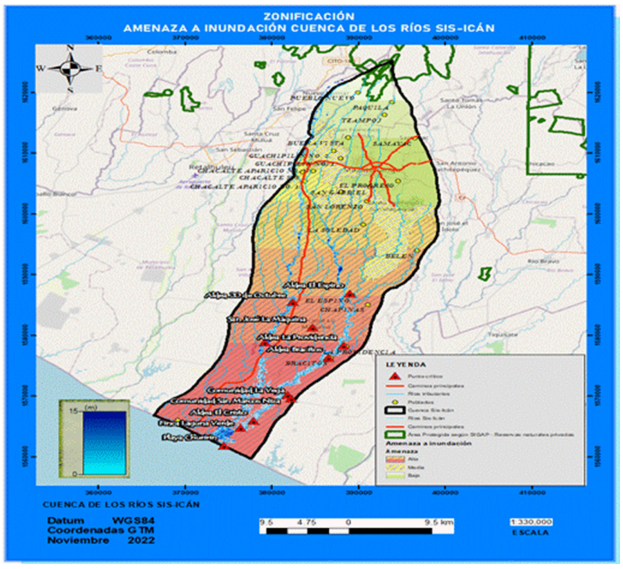


Figura 1. Zonificación final de áreas con amenaza de inundación.

El análisis detallado permitió identificar 11 puntos críticos de alta amenaza que requieren intervención prioritaria (Tabla 2). Estos incluyen aldeas, fincas, centros comunitarios y tramos urbanos cuya vulnerabilidad exige la formulación e implementación de un plan de emergencia. A partir de estos resultados, se proponen las siguientes medidas de gestión de riesgos:

- Obras de protección y monitoreo: construcción y mantenimiento de defensas ribereñas, y monitoreo estructural de puentes.
- Planificación territorial: reubicación de comunidades en zonas de alto riesgo no mitigable y actualización de normativas de construcción que restrinjan el desarrollo en áreas inundables.
- Fortalecimiento comunitario: implementación de programas continuos de educación y capacitación en gestión del riesgo.
- Sistemas de alerta: gestión ante la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED) para la instalación de un sistema de alerta temprana ante lluvias extremas, que permita activar protocolos de evacuación con suficiente antelación.

Este estudio proporciona, por tanto, información valiosa y con base científica para que las autoridades locales y municipales puedan planificar e implementar medidas preventivas y de respuesta, reduciendo así la vulnerabilidad de las comunidades ante el riesgo de inundaciones (Boza y Tenorio, 2021).

CONCLUSIONES

El análisis y caracterización de la cuenca de los ríos Sis-Icán permite entender su comportamiento hidrológico e hidráulico y detectar las áreas con susceptibilidad a inundaciones. Este análisis tiene como base la recopilación de información climática, hidrométrica y biofísica de la cuenca, el diagnóstico y análisis del comportamiento hídrico; así como la modelación hidráulica de los cauces.

La zonificación de la cuenca contribuye a determinar su situación hidrológica e hidráulica, facilitando la elaboración de medidas de prevención y mitigación de amenazas asociadas a inundaciones, gracias al gran beneficio que aporta la utilización de sistemas de información geográfica.

El estudio hidrológico demuestra que los caudales extremos estimados para eventos de alta magnitud, particularmente para periodos de retorno de 100 años, presentan una variabilidad significativa según el método de cálculo empleado, lo que evidencia la necesidad de adoptar criterios probabilísticos múltiples y no una única referencia técnica para la toma de decisiones estructurales en la cuenca.

La modelación de inundaciones confirma que la amenaza hídrica no se distribuye homogéneamente en el territorio, sino que se concentra en sectores específicos de la cuenca, donde la recurrencia de eventos extremos impone la necesidad de priorizar la identificación precisa de zonas que deben permanecer libres de ocupación permanente.

Tabla 2. Puntos críticos con amenaza a inundaciones la Cuenca de los Ríos Sis-Icán

Punto de alta amenaza	Nombre	Coordenadas geográficas	Río
Aldea	Aldea El Cristo	14.1583380, -91.6310309	Icán
Finca	Finca Laguna Verde	14.148107, -91.645178	Icán
Playa	Churirín	14.1208915, -91.66282529	Etero Tulate o unión ríos Sis-Icán
Aldea	Bracitos	14.253162, -91.551325	Icán
Centro comunitario	Comunidad San Marcos Niza	14.197594, -91.595165	Icán
Aldea	Comunidad La vega	14.191930, -91.591067	Icán
Aldea	La Providencia	14.270796, -91.535482	Icán
Aldea	El Espino	14.348862, -91.528893	Icán
Garita Municipal y conjunto de casas	Garita Municipal y conjunto de casas de San Andrés Villaseca	14.2758203, -91.619876	Sis
Aldea	Aldea 20 de Octubre	14.3353172, -91.5902713	Sis
Municipio	San José La Máquina	14.298012, -91.569135	Sis

El estudio evidencia que la gestión del riesgo de inundación no depende solamente de soluciones hidráulicas estructurales, sino que requiere del fortalecimiento de instrumentos sociales y normativos como educación comunitaria, regulación del suelo y sistema de alerta temprana como componentes centrales de cualquier estrategia de adaptación a largo plazo.

Se debe extender la presente investigación, profundizando en los aspectos aquí identificados con el fin de perfeccionar los resultados y proporcionar herramientas aún más precisas y adecuadas para una gestión efectiva y sostenible del riesgo de inundaciones en la cuenca.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BÓSIO, C.L.G.; RODRIGUES DE OLIVEIRA TRINDADE, J.: "Sociedad posmoderna, consumo sostenible y organización de las Naciones Unidas: la búsqueda incompleta de la solidaridad", *Veredas do Direito*, 20: e202445, 2023, ISSN: 1806-3845, ISSN: : 2179-8699., DOI: https://doi.org/10.18623/rvd.v20.2445.

BOZA, A.A.; TENORIO, A.C.: "Determinación de zonas inundables con HEC-RAS en zonas de la Cordillera Central de los Andes. Microcuenca del río Saraus-río La Llanga. Celendín", *Instituto de investigación. Fac. minas metal. cienc. geogr*: 181-187, 2021.

CABRALES, D.S.; LÓPEZ, C.W.: "Una región en riesgo: oportunidades, vacíos y desafíos para la investigación social de desastres en Centroamérica", *Anuario de Estudios Centroamericanos*, 49: 257-289, 2023, ISSN: 2215-4175, DOI: http://dx.doi.org/10.15517/aeca.v49i00.60598.

COBEÑA, M.M.; ZAMBRANO, M.B.; REYES, W.C.; CARRIEL, J.P.; ARROBO, J.R.; FLORES, N.Z.: "Caracterización hidrológica de la microcuenca del estero Hondo, cantón La Maná, Ecuador", *Revista Ciencia y Tecnología*, 16(2): 35-48, 2023, ISSN: 1390-4043.

DE MIGUEL, C.J.; SÁNCHEZ, J.: "Medio ambiente y desarrollo sostenible: desafíos contemporáneos para la CEPAL y América Latina y el Caribe", 2023.

GALLO, Á.A.G.; SÁNCHEZ, D.K.: "Gestión de riesgos de desastres y cambio climático en la provincia de Alto Amazonas", *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(5): 6686-6727, 2021, ISSN: 2707-2215, DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i5.791.

GARCÍA, W.; DELFÍN, M.; LEDEZMA, M.; ARÉVALO, B.: "Integrando métodos de evaluación de riesgos de deslizamientos e inundaciones en cuencas del Tunari y zona de Alto Cochabamba", *Acta Nova*, 10(1): 61-95, 2021, ISSN: 1683-0789.

GUTIÉRREZ, G.J.V.; RUBIÑOS, P.J.E.; FERNÁNDEZ, R.D.S.; RAMÍREZ, A.C.; ROBLERO, H.R.; GUTIÉRREZ, G.F.G.; ROMERO, S.M.E.: "Modelación hidráulica en Iber para prevención de inundaciones en la cuenca Tesechoacán", *Revista mexicana de ciencias forestales*, 13(71): 159-181, 2022, ISSN: 2007-1132, DOI: https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i71.1238.

LOZANO, V.M.A.; VALERIANO, L.K.: "Calibración y Validación de un modelo Hidrológico mediante el WEAP método humedad del suelo, para la cuenca alta del Río Guadalquivir", *Ciencia Sur*, 7(8): 72-88, 2022, ISSN: 2789-4738.

MACHACUAY, J.C.; LOZANO, R.R.: "Gestión sostenible de recursos hídricos y gobernanza del agua: revisión de literatura científica 2010-2024.", *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 12(1): 78-87, 2025, ISSN: 1390-7697.

MALDONADO, T.; ALFARO, E.J.; HIDALGO, H.G.: "Análisis de los conglomerados de precipitación y sus cambios estacionales sobre América Central para el período 1976-2015", *Revista de Matemática Teoría y Aplicaciones*, 28(2): 337-362, 2021, ISSN: 1409-2433, DOI: http://dx.doi.org/10.15517/rmta.v28i2.42322.

MORAN, G.M.R.; GUERRERO, C.J.M.; MIELES, G.J.W.; CABRERA, V.C.A.: "Evaluación de Indicadores para la Gestión Integrada de Recursos Hídricos en Cuencas Hidrográficas", *Journal of Economic and Social Science Research*, 4(4): 25-38, 2024, ISSN: 2953-6790, DOI: https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v4/n4/12.

MORETTO, B.; GENTILI, J.O.: "Morfometría de una cuenca serrana no aforada: el caso del arroyo Sauce Corto (Buenos Aires, Argentina)", *Investigaciones Geográficas: Una mirada desde el sur*, (68): 88-102, 2024, ISSN: 0719-5370.

OLIVET, E.J.R.; TOBAR, M.S.: "Análisis de la Incidencia de los Casos de Asfixia por Sumersión en Guatemala (2018-2022)", *Revista Científica Diálogo Forense*, 4(7), 2023, ISSN: 2789-8458.

RIVERA, J.; LAURO, C.; OTTA, S.A.: "Cuantificación del déficit hidrológico reciente en la región de Cuyo a partir de indicadores de caudales bajos", *Boletín de estudios geográficos*, (116): 23-44, 2021, ISSN: 2525-1813.

RODRÍGUEZ, C.C.; GARFIAS, J.; MARTEL, R.; NAVARRO-DE LEÓN, I.: "Estimación espacio-temporal de la distribución de la recarga potencial en el Valle de Toluca", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 75(2), 2023, ISSN: 1405-3322, DOI: https://doi.org/10.18268/bsgm2023v75n2a080523.

SALDAÑA, E.R.; OTALVAREZ, H.R.; HERRERA, G.J.D.: "Oferta hídrica superficial mediante el método lluvia-escorrentía, caso de estudio humedal el Gallinazo, Aguachica (Cesar-Colombia)", *RIAA*, 14(1): 10, 2023, ISSN: 2145-6453, DOI: https://doi.org/10.22490/21456453.5959.

SANDOVAL, J.T.R.; RODRÍGUEZ, A.S.: "Análisis morfométrico y biofísico en la cuenca del río Talgua, Honduras", *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(6): 12024-12042, 2021, ISSN: 2707-2215.

SUAZO, L.E.; TORRES, V.A.: "Percepciones, conocimiento y enseñanza de cambio climático y riesgo de desastres en universidades hondureñas", *Formación universitaria*, 14(1): 225-236, 2021, ISSN: 0718-5006, DOI: http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062021000100225.

VALLEJO, V.D.P.; REYES, Z.J.L.; TENESACA, S.M.E.; ALARCÓN, L.J.R.: "Modelación Hidráulica HEC-RAS para la Estimación y Simulación de Inundaciones en la Quebrada Cunduana, Riobamba", *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación. ISSN: 2697-3693.*, 7(14): 344-366, 2024, ISSN: 2697-3693.

VÁSQUEZ, V.; SCHUEFTAN, A.; HORN, A.A.: "Persistencia de los paisajes rurales: los conjuntos arquitectónicos productivos de la cuenca del río San Pedro, Región de los Ríos, Chile", *Contexto: Revista de la Facultad de Arquitectura Universidad Autónoma de Nuevo León*, 19(30): 32-52, 2025, ISSN: 2007-1639.

VILLÓN, M.: *Hidrología*, Ed. Editorial Tecnológica de Costa Rica, Costa Rica, 2024.