



Simulación de inundaciones en el río la Llanga (Perú) mediante modelamiento hidrológico con HEC-HMS y HEC-GeoRAS

Flood simulation in the La Llanga river (Peru) using hydrological modeling with HEC-HMS and HEC-GeoRAS

Simulação de inundações no rio Llanga (Peru) por meio de modelagem hidrológica com HEC-HMS e HEC-GeoRAS

Alejandro Alcántara Boza¹

Universidad Hipócrates, Acapulco – Estado de Guerrero, México
Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi, Perú, Puno – Perú

 <https://orcid.org/0000-0001-9127-4450>
falcantara@inudi.edu.pe (correspondencia)

Karen Gonzales-Plasencia

Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

 <https://orcid.org/0000-0001-7634-684X>
andreagonzp@gmail.com

Francisco Velásquez-Intriago

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí, Calceta – Manabí, Ecuador

 <https://orcid.org/0000-0001-6654-6119>
dr.franciscovelasquezin@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.35622/j.rca.2025.01.002>

Recibido: 01/11/2024 Aceptado: 30/12/2024 Publicado: 07/01/2025

PALABRAS CLAVE

cuenca, inundación,
modelo de simulación,
río La Llanga.

RESUMEN. Las inundaciones son un fenómeno de ocurrencia poco predecible en valles interandinos. El presente estudio se desarrolló en el río La Llanga, ubicado en la región norte del Perú (Cajamarca – Celendín), afluente del río Marañón, en el curso medio de la Cordillera de los Andes. Se emplearon los programas HEC-HMS y HEC-GeoRAS para modelar eventos de inundación considerando un período de retorno de 50 años. Las principales problemáticas identificadas incluyen la pérdida de cultivos, ganado, viviendas y vidas humanas, lo que resalta la necesidad de implementar sistemas de modelamiento hidrológico que contribuyan a la generación de alertas tempranas y a la concientización de la población y agricultores asentados en zonas ribereñas. La investigación es de tipo cuantitativo, descriptivo y no experimental. Se analizó un tramo de 5,066 metros del cauce principal del río, entre la confluencia con el río Saraus y su desembocadura en el río Grande (Llanguat). Se aplicaron sistemas de grillas y transeptos para

¹ Egresado del Posdoctorado en Metodología de la Investigación y Producción Científica. Universidad Hipócrates y el Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología, Perú



identificar zonas críticas de mayor profundidad, velocidad y amplitud del flujo. Los resultados del modelo indicaron velocidades de hasta 4.89 m/s, anchos de inundación máximos de 188 metros y caudales superiores a 400 m³/s, con arrastre de sedimentos y material rocoso. Estos eventos generan impactos significativos sobre superficies agrícolas y actividades turísticas cercanas al cauce. Se concluye que el conocimiento detallado de la dinámica fluvial es esencial para reducir los riesgos y optimizar el uso del territorio en zonas vulnerables.

KEYWORDS

basin, flood, simulation model, La Llanga River.

ABSTRACT. Floods are a phenomenon with low predictability in inter-Andean valleys. This study was conducted on the La Llanga River, located in the northern region of Peru (Cajamarca – Celendín), a tributary of the Marañón River, within the middle course of the Andes Mountains. The HEC-HMS and HEC-GeoRAS programs were used to model flood events, considering a return period of 50 years. The main issues identified include the loss of crops, livestock, housing, and human lives, highlighting the need to implement hydrological modeling systems that support the development of early warning mechanisms and raise awareness among the population and farmers living in riparian zones. The research is quantitative, descriptive, and non-experimental in nature. A 5,066-meter stretch of the main riverbed was analyzed, between the confluence with the Saraus River and its mouth at the Grande River (Llanguat). Grid systems and cross sections were applied to identify critical areas with greater flood depth, flow width, and velocity. The model results indicated flow velocities of up to 4.89 m/s, flood widths of up to 188 meters, and discharges exceeding 400 m³/s, with sediment and rock transport. These events have a significant impact on agricultural lands and tourism activities near the riverbed. It is concluded that a detailed understanding of fluvial dynamics is essential to reduce risks and optimize land use in vulnerable areas.

PALAVRAS-CHAVE

bacia, inundação, modelo de simulação, rio La Llanga.

RESUMO. As inundações são fenômenos de ocorrência pouco previsível em vales interandinos. Este estudo foi realizado no rio La Llanga, localizado na região norte do Peru (Cajamarca – Celendín), afluente do rio Marañón, no curso médio da Cordilheira dos Andes. Foram utilizados os programas HEC-HMS e HEC-GeoRAS para modelar eventos de inundação, considerando um período de retorno de 50 anos. Os principais problemas identificados incluem a perda de culturas agrícolas, gado, moradias e vidas humanas, o que ressalta a necessidade de implementar sistemas de modelagem hidrológica que contribuam para a geração de alertas precoces e para a conscientização da população e dos agricultores que vivem em zonas ribeirinhas. A pesquisa é de natureza quantitativa, descritiva e não experimental. Analisou-se um trecho de 5.066 metros do leito principal do rio, entre a confluência com o rio Saraus e sua foz no rio Grande (Llanguat). Foram aplicados sistemas de grade e transectos para identificar áreas críticas com maior profundidade de inundação, largura do fluxo e velocidade. Os resultados do modelo indicaram velocidades de até 4,89 m/s, larguras máximas de inundação de 188 metros e vazões superiores a 400 m³/s, com transporte de sedimentos e materiais rochosos. Esses eventos geram impactos significativos sobre áreas agrícolas e atividades turísticas próximas ao leito do rio. Conclui-se que o conhecimento detalhado da dinâmica fluvial é essencial para reduzir riscos e otimizar o uso do território em áreas vulneráveis.

1. INTRODUCCIÓN

Los fenómenos meteorológicos, entre ellos las altas precipitaciones, son un factor clave en la modelación y transformación continua de la superficie terrestre. Estos fenómenos, según la región, impactan de manera diferenciada y generan consecuencias en las zonas aledañas a las riberas de los ríos.

En el Perú, la diversidad climática condiciona comportamientos variables en la recepción y crecida de los ríos, lo que deriva en la pérdida de cultivos, viviendas, ganado y, en ocasiones, vidas humanas, especialmente en las áreas cercanas a los cursos medios de los ríos interandinos.

La respuesta a las lluvias intensas se manifiesta en aumentos significativos de los caudales, superando sus niveles habituales. Un ejemplo emblemático es el registro de 838 m³/s en la cuenca del río Mantaro (La Oroya) durante 1994 (Sarango et al., 2018). Incluso en cuencas áridas, como la quebrada Huaycoloro, se proyectan tendencias de hasta 50.40 m³/s en un periodo de 50 años (Romero et al., 2010). Casos extremos incluyen simulaciones en la cuenca alta del Guadalentín, donde se estimaron caudales máximos entre 15 m³/s y 1616 m³/s para garantizar la protección de la presa Valdeinfierno (Benito et al., 2004). Estos incrementos, influenciados por las condiciones geomorfológicas, elevan los niveles de agua más allá de los parámetros normales del cauce principal, provocando inundaciones o ascensos temporales del agua, cuya duración varía según el tipo de río.

Los periodos de alta precipitación son fenómenos recurrentes que generan incertidumbre debido a su variabilidad. Por ejemplo, en la cuenca del Pánuco (México) se registraron lluvias extremas de 150 mm cada 2.9 años, con proyecciones de alcanzar 323 mm en 24 horas hacia 2050 (Sánchez González, 2011). En contraste, la cuenca del río Una (Palmares, Brasil) presenta precipitaciones anuales de 1508 mm (Araújo de Lucena et al., 2016). Otros casos, como las cuencas del Esca y el Gállego en el Pirineo aragonés y navarro (España), reportaron intensidades diarias entre 153 mm y 170 mm en distintos años (Beguería & Lorente, 1999).

Las inundaciones son un fenómeno natural que, al interactuar con actividades antrópicas, puede ocasionar pérdidas económicas y humanas. Durante la última década del siglo XX, estos eventos causaron cerca de 100 000 muertes y afectaron a aproximadamente 1.4 millones de personas en el mundo (CENEPRED, 2014). Un ejemplo específico es el estado de Kerala (India), donde las inundaciones destruyeron 800 viviendas, 240 puentes y otras infraestructuras (Devanand y Kundapura, 2021). Por ello, los modelamientos en GIS se han convertido en herramientas clave para la planificación, como el uso combinado de GIS y HEC-RAS para elaborar mapas de peligro por inundaciones (Demir y Kisi, 2016; Lohpaisankrit et al., 2016), complementados con datos de sensores remotos (Elkhrachy, 2018).

La simulación es un mecanismo clave para comprender, pronosticar y plantear alternativas ante posibles eventos futuros. Se realizan simulaciones en áreas como precipitaciones (Urdiales y Céleri, 2018), caudales (Romero et al., 2010), clima y recursos hídricos (Velásquez et al., 2019), entre otros, siendo relevante para este estudio el análisis de caudales en cuencas interandinas.

Existen pocos estudios sobre el efecto de las inundaciones en los cursos alto y medio de los ríos (valles interandinos) (Rahman et al., 2024), lo cual se explica por el escaso desarrollo de actividades humanas cerca de sus riberas. En estas zonas medias, las actividades principales son agrícolas: cultivos estacionales o permanentes.

El impacto de las inundaciones en valles interandinos es poco conocido o difundido, pese a afectar significativamente a las comunidades andinas. Estas sufren pérdidas de cultivos —cultivados en terrazas aprovechadas para productos locales—, destrucción de viviendas rústicas construidas cerca de áreas inundables y muerte de ganado que pasta en zonas con grama y pastos naturales. Los repentinos crecimientos de los ríos, provocados por lluvias intensas, derivan inevitablemente en pérdidas económicas para los pobladores.

En este contexto, el objetivo del estudio fue modelar las inundaciones en la cuenca media del río La Llanga, ubicada en los cursos medios de ríos de la Cordillera de los Andes, considerando un periodo de retorno de 50 años mediante los programas HEC-HMS y HEC-GeoRAS.

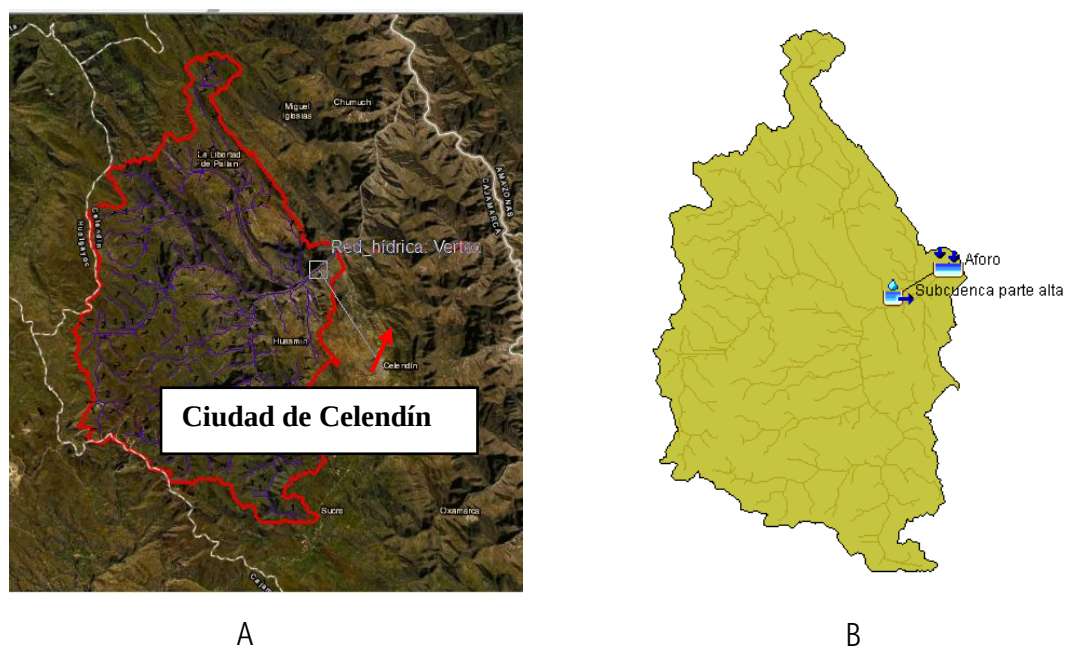
2. METODOLOGÍA

La investigación es de tipo cuantitativo, descriptivo y no experimental (Hernández-Sampieri et al., 2014), ya que no se manipulan variables y se toman en consideración las características del río y los datos meteorológicos para el proceso de modelamiento.

Como área de estudio, se seleccionó el tramo principal del río La Llanga en su curso medio (5066 m lineales), comprendido entre la confluencia del río Saraus y la confluencia con el río Grande, en el poblado de Mamác-Llanguat. Políticamente, esta zona pertenece a la provincia de Celendín, región de Cajamarca, Perú. El espacio analizado se ubica aproximadamente a 11 km (en línea recta) al norte de la ciudad de Celendín (Figura 1).

Figura 1

Ubicación geográfica de la cuenca del río La Llanga y curso del río a simular.



Nota. Determinación del área de estudio en la parte media de la cuenca del río la Llanga en la provincia de Celendín.

Para el modelamiento de inundaciones, se necesitaron datos de caudales, obtenidos a partir de precipitación diaria recopilada en cinco estaciones cercanas a la cuenca que influyen en la parte alta del río La Llanga. Posteriormente, se empleó el programa HEC-HMS, un modelo hidrológico desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU. La simulación consideró como punto inicial el tramo donde confluyen los caudales de las microcuencas Quinuamayo, Potrerillo, Jadibamba y Sendamal, ubicándose el punto de aforo en la parte media del río La Llanga, antes de su intersección con el río Grande proveniente de la ciudad de Celendín (ver Figura 1).

Adicionalmente, se aplicó el método del número de curva (CN), un modelo empírico desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, que determina el umbral de escorrentía mediante un valor hidrológico (Mekonnen et al., 2015). Este método fue propuesto para evaluar la precipitación neta generada por una tormenta (Monsalve Sáenz, 1995), considerando el volumen de precipitación antecedente en periodos de

5 a 30 días, con el fin de estimar el escurrimiento directo esperado ante una precipitación específica (ecuaciones 1 y 2).

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.2S)} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$S = \frac{100}{CN} - 10 \quad \text{Ecuación (2)}$$

Para determinar el valor del número de curva y la textura de suelos en la cuenca de estudio, se utilizó Google Earth y visitas de campo. En el cauce del río, se identificaron materiales como canto rodado compuesto por rocas de diversos tipos, que abarcan desde partículas finas hasta fragmentos redondeados de hasta 60 cm de diámetro, e incluso de mayor tamaño. La vegetación incluye plantas arbóreas distribuidas de forma dispersa a lo largo del curso fluvial, así como acumulaciones de suelo en terrazas de primer nivel utilizadas como áreas de cultivo.

La textura del suelo, según el mapa de estudios de suelos y capacidad de uso mayor de la región de Cajamarca (Gobierno Regional de Cajamarca, 2011), corresponde a franco, franco arenoso y franco limoso. En función de estos datos, se asignó un número de curva de 80.

Según Vélez y Botero (2011), el tiempo de concentración y el tiempo de retraso (Ecuaciones 3 y 4) son variables clave en el diseño hidrológico para estimar la capacidad hidráulica máxima. Estos parámetros dependen de las características geomorfológicas de la cuenca y de las precipitaciones.

$$Tr = 0.066 * Tc \quad \text{Ecuación (3)}$$

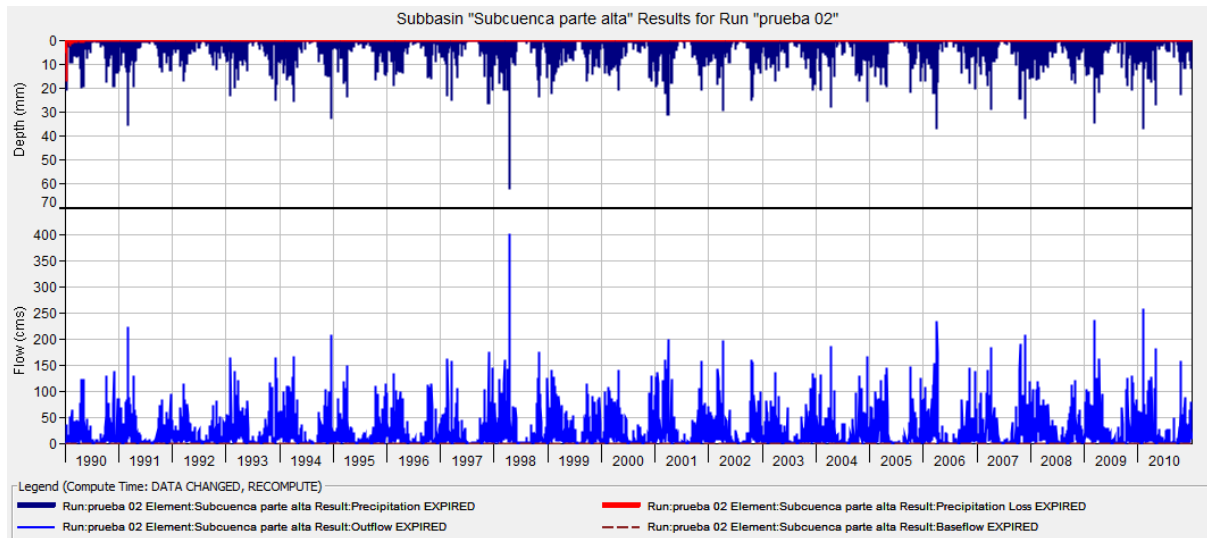
$$Tc = 0.066 * \left(\frac{L}{j^{0.55}}\right)^{0.77} \quad \text{Ecuación (4)}$$

De las ecuaciones 3 y 4, el tiempo de concentración fue 81 minutos y el tiempo de retraso de 48.6 minutos, dato necesario para utilizarlo en el software HEC-HMS.

Luego de haber obtenido los datos que se necesitan para la simulación en el software, se obtuvo la simulación de caudales diarios para un periodo de 21 años (Figura 2).

Figura 2

Obtención de los caudales diarios para un periodo de 21 años



Otro proceso necesario para el presente estudio es determinar el caudal máximo instantáneo (Q_i), el cual se halla a partir de la relación de Fuller (Ecuaciones 5 y 6).

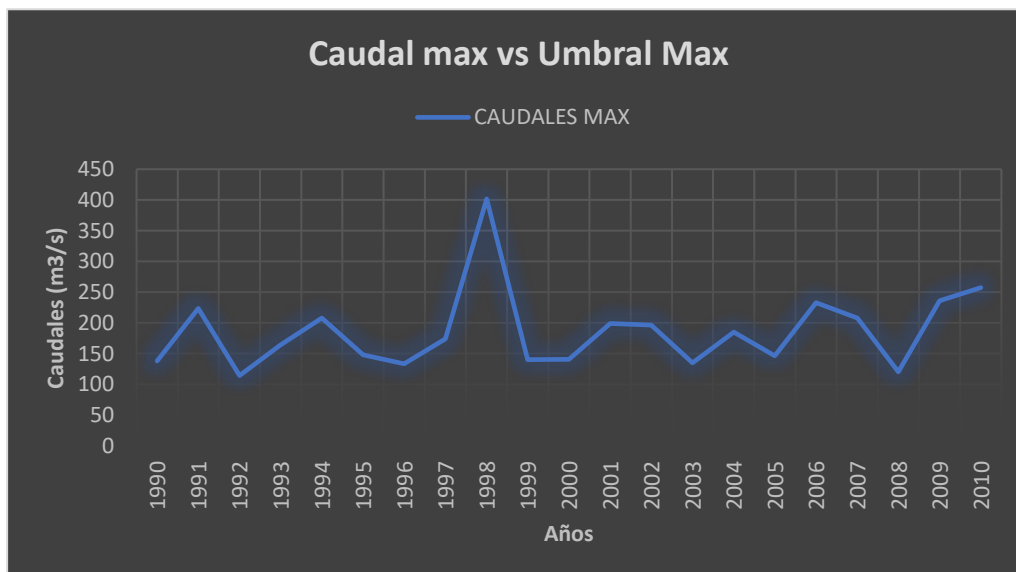
$$Q_i = c \cdot Q_d, \quad \text{Ecuación (5)}$$

$$c = 1 + \frac{a}{A^b} \quad \text{Ecuación (6)}$$

El caudal máximo instantáneo, se obtuvo del caudal máximo de cada año en un periodo de 21 años de análisis. La Figura 3 muestra los caudales máximos anuales, data base para identificar eventos extraordinarios.

Figura 3

Comparación de los caudales máximos con el umbral máximo

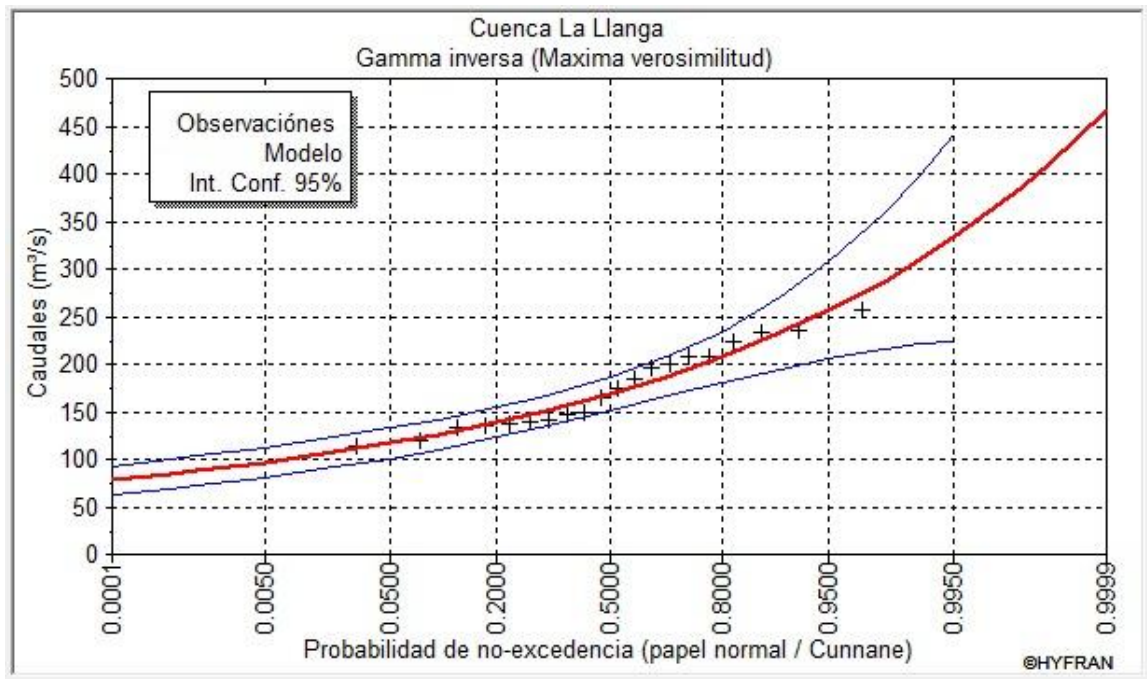


Los datos obtenidos fueron procesados en el software Hyfran para evaluar las diferentes distribuciones en el análisis del periodo de retorno para 21 años; para este cálculo, se escogió el periodo de retorno de crecida y la fórmula de probabilidad empírica de Cunnane (con el que cuenta este software).

Luego de obtener la comparación de modelos de distribución se observó que el Modelo de Gamma inversa es el que más se ajusta para nuestro proyecto para un periodo de retorno de 50 años.

Figura 4

Diseño gráfico aplicado al análisis de caudales de retorno



Una vez obtenido el caudal máximo anual ($309.81 \text{ m}^3/\text{s}$) mediante el modelo Gamma inversa para un periodo de retorno de 50 años, se calculó el caudal máximo instantáneo utilizando la Ecuación 5, lo que arrojó un valor de $Q_i = 424.04 \text{ m}^3/\text{s}$. Estos datos fueron empleados como insumo para el modelo HEC-RAS.

Para la delimitación de la cuenca hidrográfica, se utilizó un Modelo Digital de Elevación (DEM) de 12.5 m de resolución espacial proveniente del satélite ALOS PALSAR. Este fue procesado en el software ArcGIS 10.8 tomando como referencia el punto de desagüe principal. En ArcMap 10.8 se generaron curvas de nivel cada 10 m a partir del DEM, las cuales sirvieron para crear una Red Irregular de Triángulos (TIN). Adicionalmente, se incorporó una base cartográfica de referencia para precisar la sección fluvial de estudio.

Posteriormente, mediante la herramienta HEC-GeoRAS en ArcGIS 10.8, se modeló la sección del río correspondiente al área de análisis, definiendo los bancos, la dirección del flujo y las secciones transversales. El tramo seleccionado abarcó 5066 m de longitud, con secciones transversales de 170 m de ancho espaciadas cada 210 m entre sí. Esta geometría se exportó al software HEC-RAS 5.0.7 para su análisis hidráulico (Figura 5). Una vez cargada la geometría en HEC-RAS, se pueden visualizar los perfiles transversales de cada sección dentro del tramo principal del río.

Figura 5

Diseño de datos de geometría y secciones transversales en la cuenca del río la Llanga – Celendín

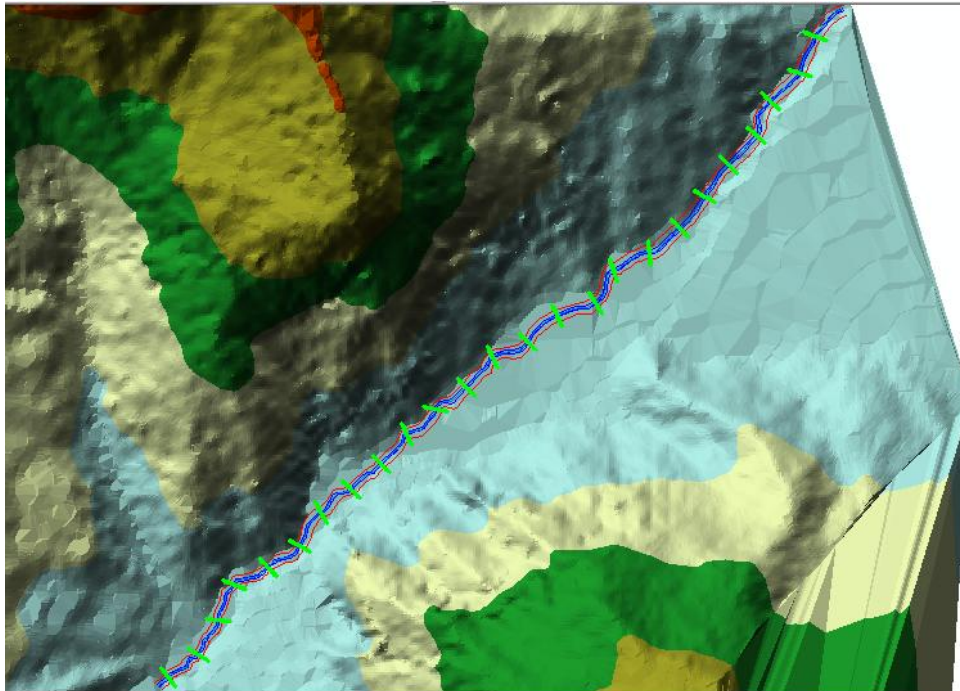
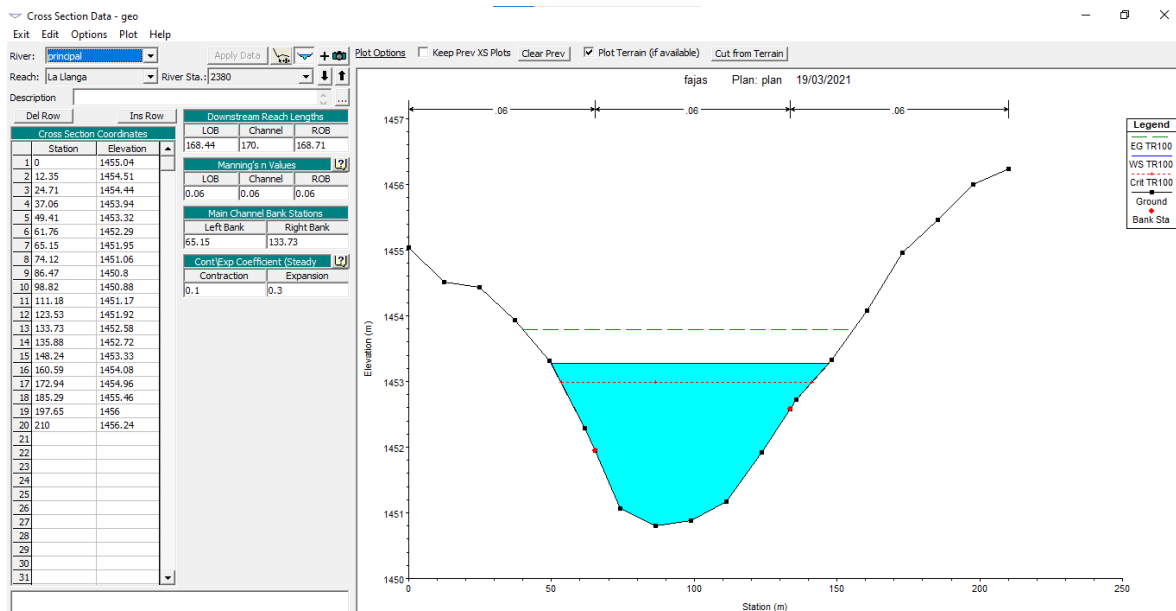


Figura 6

Visualización de las secciones de corte el modelamiento



Para el análisis de inundaciones, también es necesario considerar los valores de resistencia de la superficie por donde circula el flujo. Para ello, se utilizó el coeficiente de Manning con un valor de 0.06, determinado mediante identificación de campo.

Luego de exportar la geometría, obtenidas las secciones transversales e incorporado el coeficiente de Manning, se procedió a ingresar los datos de flujo constante. Con esta información, se ejecutó la simulación de flujo constante mediante la interfaz de HEC-RAS, obteniendo como resultado las secciones de inundación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La simulación del caudal máximo para un periodo de retorno de 50 años en el valle interandino del río La Llanga revela comportamientos variables en velocidad, elevación del caudal y dinámica de cursos hídricos. Esta variabilidad responde a las marcadas heterogeneidades geomorfológicas del valle, fenómeno que Hortua Cortes (2004) asocia con la influencia morfodinámica de los cauces en sistemas fluviales interandinos.

Un caso análogo se observa en el río Hacha (Colombia), donde el cauce principal incide directamente en la configuración de las terrazas adyacentes. De manera similar, el río La Llanga presenta sectores con cauces encajonados alternados con superficies abiertas de amplia planicie aluvial. Estos últimos se caracterizan por desarrollar terrazas contiguas al canal principal con desniveles inferiores a 3 metros, rasgos geomorfológicos atribuibles a procesos históricos de inundación.

Figura 7

Visualización en 3D de la simulación de inundaciones para periodos de retorno de 50 años

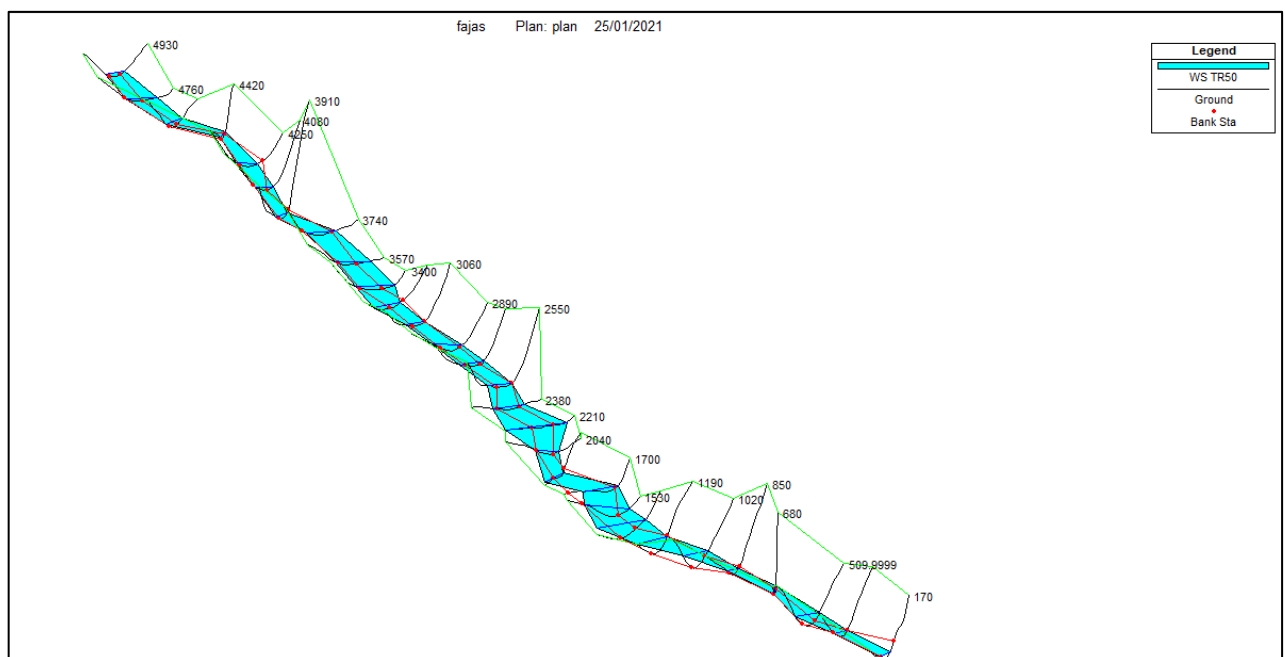


Tabla 1

Perfil obtenido de las simulaciones de inundación para un periodo de retorno de 50 años

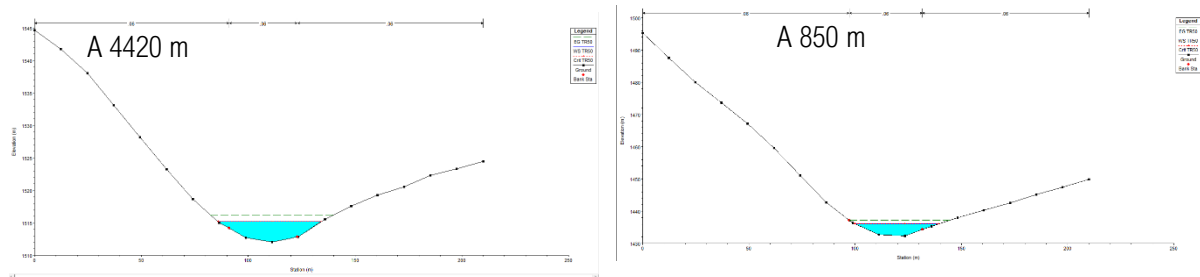
Reach	River Sta	Profile	Qtotal	Min Ch El	W.W.Elev	E.G. Elev	Vel Ch nl	Flow Area	Top Widht
			m3/ m3/s	(m)	(m)	(m)	(m/s)	(m2)	m
La Llanga	4930	TR50	424.04	1528.52	1531.2	1532.09	4.37	107.19	61.48
La Llanga	4760	TR51	424.04	1522.15	1524.37	1525.04	3.88	120.13	87.68
La Llanga	4590	TR52	424.04	1513	1517.36	1517.65	2.58	190.19	69.24
La Llanga	4420	TR53	424.04	1512.01	1515.17	1516.23	4.71	96.99	48.11
La Llanga	4250	TR54	424.04	1502.25	1505.02	1505.91	4.23	103.33	59.73
La Llanga	4080	TR55	424.04	1496.9	1499.87	1500.85	4.54	97.67	49.77
La Llanga	3910	TR56	424.04	1488.17	1491.55	1492.38	4.16	107.99	49.1
La Llanga	3740	TR57	424.04	1485.36	1487.92	1488.62	3.74	116.5	85.61
La Llanga	3570	TR58	424.04	1475.34	1477.53	1478.16	3.77	129.69	102.37
La Llanga	3400	TR59	424.04	1469	1472.04	1472.22	1.96	237.62	109.01
La Llanga	3230	TR60	424.04	1468.36	1471.09	1471.36	2.15	185.35	89.05
La Llanga	3060	TR61	424.04	1466	1468.34	1469.19	4.27	105.59	63.25
La Llanga	2890	TR62	424.04	1458.18	1462.86	1463.05	2.01	230.12	82
La Llanga	2720	TR63	424.04	1458.98	1461.4	1462.06	3.75	122.59	76.66
La Llanga	2550	TR64	424.04	1455	1457.12	1457.91	4.16	109.84	73.19
La Llanga	2380	TR65	424.04	1450.8	1453.21	1453.69	3.14	142.09	94.95
La Llanga	2210	TR66	424.04	1448.05	1449.96	1450.37	3.2	162.58	188.2
La Llanga	2040	TR67	424.04	1441.85	1444.26	1445.12	4.21	105.46	66.12
La Llanga	1870	TR68	424.04	1437.56	1439.87	1440.3	3.1	148.37	107.12
La Llanga	1700	TR69	424.04	1434.07	1437.35	1437.68	2.55	169.04	112.55
La Llanga	1530	TR70	424.04	1430	1437.41	1437.44	0.78	569.68	131.14
La Llanga	1360	TR71	424.04	1427	1437.42	1437.42	0.4	1163.29	160.57
La Llanga	1190	TR72	424.04	1427	1437.4	1437.41	0.64	729.73	112.36
La Llanga	1020	TR73	424.04	1426.09	1437.87	1437.39	0.79	595.28	84.88
La Llanga	850	TR74	424.04	1432.3	1436.02	1437.2	4.89	90.22	39.24
La Llanga	680	TR75	424.04	1427.13	1430.51	1431.23	3.79	113.16	79.91
La Llanga	510	TR76	424.04	1411.92	1420.61	1420.67	1.09	442.96	77.58
La Llanga	340	TR77	424.04	1415.93	1419.31	1420.4	4.64	91.47	42.35
La Llanga	170	TR78	424.04	1409.03	1412.08	1413.02	4.3	99	54.2

Nota. La tabla muestra los diferentes parámetros de modelamiento del proceso de inundación en cada uno de los tramos establecidos a lo largo del cauce del río de La Llanga.

La Tabla 1, nos muestra datos de la simulación de inundación para un periodo de retorno de 50 años por cada sección transversal, brindándonos información de la altitud del canal, el caudal, área de flujo, el tirante crítico de la pendiente para cada estación, la velocidad en cada sección y el ancho de cada sección transversal. También se muestra que existe alta variabilidad de los parámetros evaluados. Ello nos permite observar que los ríos interandinos son altamente variables y de un difícil comportamiento y pronósticos, para ello es importante tener en cuenta análisis geomorfológico y topográfico en el proceso de variabilidad.

Figura 8

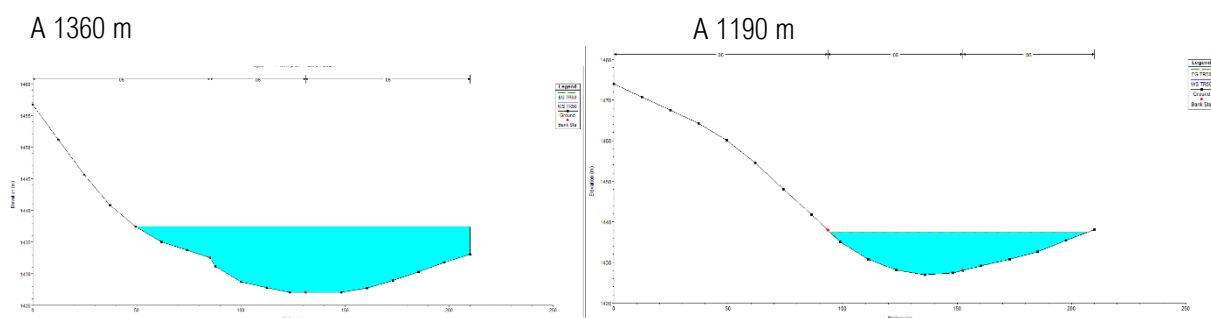
Simulación de inundación para un periodo de retorno de 50 años en secciones con mayor velocidad



En la Figura 8, se observa que en los puntos de muestreo 4420 y 850, datos de rapidez de flujo con mayor velocidad, siendo máximo en el lugar denominado puente la Llanga con velocidades de 4.71 y 4.89 m/s respectivamente, esto obedece a que estos espacios son altamente encajonados, cerrados y con ciertas caídas abruptas, valores que son equiparables a los presentados por López et al. (2008). En cambio, en la Figura 9, se observa las mayores profundidades de acumulación de agua (mayor a 10m) con mayores áreas de flujo de 1160 m² y 729 m², respectivamente. En los tramos 1360-1190, se asocia la profundidad y la sección de ancho alcanzando incluso a inundar las primeras terrazas que se han ido formando a lo largo del tiempo, ello genera la dirección de las corrientes de agua que queda como flujo en las épocas de disminución de caudales.

Figura 9

Tramos de mayor inundación, correspondiente a la zona de Mamác

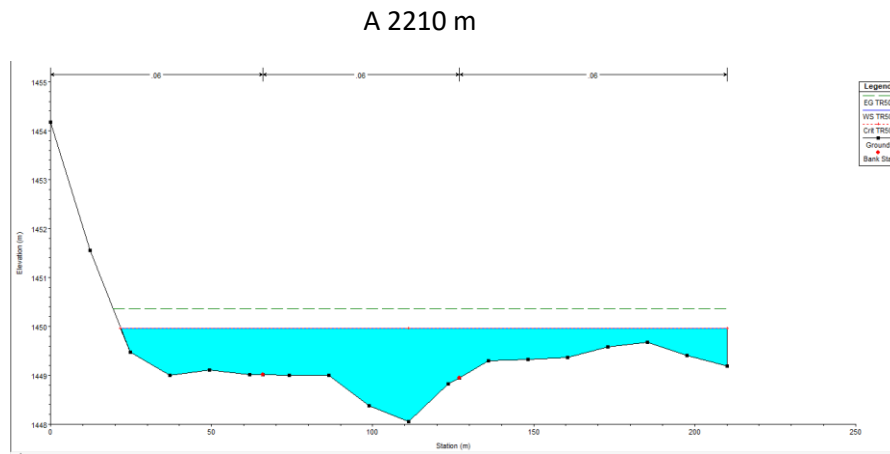


Un hallazgo relevante en la modelación de inundaciones para valles interandinos corresponde a la extensión areal máxima registrada, que varía desde 160 m en la sección transversal 1360 hasta 188 m en la 2210, localizadas en el sector de Baños Mamác. No obstante, esta variabilidad espacial está condicionada por parámetros hidráulicos como profundidad y pendiente del cauce, según demuestra Gaagai et al. (2022).

Para el caso de estudio, la proyección de inundaciones afectaría críticamente las zonas agrícolas de la margen izquierda fluvial. Un análisis económico basado en Ortega & Morales (2002) estima pérdidas potenciales entre 3,000 y 4,000 millones de dólares en los sectores agropecuarios, impactando directamente la economía local. Esta relación causa-efecto entre dinámicas hidrológicas y vulnerabilidad socioeconómica constituye una línea de investigación prioritaria para estudios posteriores.

Figura 10

Mayor grado de inundación por efecto de las características del cauce del río



Otro aspecto de análisis del área de simulación es la variación en la velocidad, amplitud, recorrido, cobertura y flujo, los cuales presentan alta variabilidad a lo largo del curso del río. Correlacionando con el análisis geomorfológico, se observa que las mayores velocidades se encuentran en áreas con mayor pendiente, mientras que las zonas con mayor ancho de disposición de agua corresponden a espacios que tienden a ser llanos. Esto explica otro proceso importante que siempre se genera en una inundación: la remoción de material por carcabamiento.

4. CONCLUSIONES

Se ha logrado un modelamiento de las inundaciones en la cuenca media del río La Llanga, el cual evidencia dos fenómenos de mayor impacto: las altas variaciones de velocidad, que van desde 0.4 hasta 4.89 m/s, como efecto de las características geomorfológicas; y las amplias inundaciones en superficies llanas de hasta 188 metros de ancho, lo cual es característico de los ríos de curso medio en la Cordillera de los Andes.

Las variaciones en la velocidad, dirección del recorrido e inundación responden a las características variables de la geomorfología del río La Llanga. Se presentan espacios estrechos, como en El Platanal y el puente La Llanga, donde las velocidades superan los 4 m/s; y superficies llanas, como entre El Papayal y los Baños Mamác, donde se alcanzan mayores extensiones de inundación. En estas zonas se deben tomar mayores consideraciones para la siembra de cultivos, el pastoreo de ganado o la construcción de viviendas de resguardo, a fin de evitar pérdidas económicas.

Los efectos del cambio en el recorrido del agua también generan modificaciones en el desplazamiento y la acumulación de materiales de diferente granulometría. Por ello, es importante realizar modelamientos a mayor detalle, con el objetivo de establecer con precisión los cambios en la velocidad y la amplitud de la inundación, especialmente entre El Platanal y los Baños Mamác, dado que se trata de depósitos aluviales móviles.

Este análisis pone en evidencia la necesidad urgente de integrar la información generada por modelos hidrodinámicos en la toma de decisiones territoriales, especialmente en zonas rurales y de alta vulnerabilidad como la cuenca media del río La Llanga. Comprender cómo interactúan las condiciones geomorfológicas con

los patrones de flujo e inundación no solo permite anticipar escenarios de riesgo, sino también diseñar estrategias de prevención, mitigación y adaptación más eficaces.

Conflicto de intereses / Competing interests:

El autor declara que no incurrió en conflictos de intereses.

Rol de los autores / Authors Roles:

Alejandro Alcántara: conceptualización, curación, análisis formal de los datos, investigación, metodología, redacción, administración del proyecto y redacción-revisión y edición.

Karen Gonzales-Plasencia: recursos materiales, supervisión, validación, redacción-borrador original, revisión y edición.

Francisco Velásquez-Intriago: recursos materiales, supervisión, validación, redacción-borrador original, revisión y edición.

Fuentes de financiamiento / Funding:

El autor declara que no recibió financiamiento para la realización de la investigación.

Aspectos éticos / legales; Ethics / legal:

El autor declara no haber incurrido en aspectos antiéticos, ni haber omitido aspectos legales en la realización de la investigación

REFERENCIAS

- Araújo de Lucena, J., Suassuna de A. Wanderley, L., Ranulpho Da Silva, R., Carvalho Rocha, J., & Silva Nóbrega, R. (2016). Eventos extremos de lluvia y riesgo hidroclimático en zona de La Mata - Pernambuco/Brasil. *Investigaciones Geográficas*, (51), 81-90. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2016.41819>
- Benito, G., Rico, M., Díez Herrero, A. Sánchez-Moya, Y., Sopeñar, A. & Thorndycraft, V.R. (20-25 de setiembre de 2004). Hidrología de paleocrecidas y seguridad de presas [Acta]. VIII reunión Nacional de Geomorfología, SEG y CSiC Madrid. <https://shorturl.at/JcttF>
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. (2014). *Manual para la evaluación de riesgos originados por inundaciones fluviales*. Perú, CENEPRED. <https://shorturl.at/x6Ubl>
- Demir, V. & Kisi, O. (2016). Flood Hazard Mapping by Using Geographic Information System and Hydraulic Model: Mert River, Samsun, Turkey. *Advances in Meteorology*, 2016(1), 1-9. <https://doi.org/10.1155/2016/4891015>
- Devanand, M.R. and Kundapura, S. (2021). *Flood inundation mapping of harangi river basin, kodagu, using Gis techniques and Hec-ras model*. En M. Narasimhan, G. Varghese, G. Udayakumar & A. Kumar (Eds.), *Trends in Civil Engineering and Challenges for Sustainability* (pp. 665-678). Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-6828-2_50
- Elkhrachy, I. (2018). Assessment and Management Flash Flood in Najran Wady Using GIS and Remote Sensing. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 46(2), 297-308. <https://doi.org/10.1007/s12524-017-0670-1>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*. McGrawHill Education (6th ed.). <https://shorturl.at/rQb4n>
- Gaagai, A., Aouissi, H. A., Krauklis, A. E., Burlakovs, J., Athamena, A., Zekker, I., ... & Chenchouni, H. (2022). Modeling and risk analysis of dam-break flooding in a semi-arid Montane watershed: a case study of the Yabous Dam, Northeastern Algeria. *Water*, 14(5), 767. <https://doi.org/10.3390/w14050767>
- Gobierno Regional de Cajamarca. (2011). Estudio de suelos y capacidad de uso mayor del departamento de Cajamarca. <https://zeoot.regioncajamarca.gob.pe/sites/default/files/INFSUELOSZEE091.pdf>

- Lohpaisankrit, W., Meon, G., & Tingsanchali, T. (2016). A framework of integrated hydrological and hydrodynamic models using synthetic rainfall for flash flood hazard mapping of ungauged catchments in tropical zones. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 373, 183-187. <https://doi.org/10.5194/piahs-373-183-2016>
- López, R., Barragan, J. & Colomer, M. (2008). Predicción de la velocidad media del flujo en ríos de montaña. *Ingeniería del agua*, 15(2), 81-93. <https://doi.org/10.4995/ia.2008.2928>
- Beguería, S., & Lorente, A. (1999). Distribución espacial del riesgo de precipitaciones extremas en el Pirineo aragonés occidental. *Geographica*, (37), 17-36. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.1999371398
- Hortua Cortes, N. G. (2004). Geomorfología e hidrología, combinación estratégica para el estudio de las inundaciones en Florencia (Caquetá). *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, (13), 81-101. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4015328>
- Mekonnen, M., Melesse, A. M., & Keesstra, S. D. (2015). Spatial runoff estimation and mapping of potential water harvesting sites: A GIS and remote sensing perspective, Northwest Ethiopia. In *Landscape dynamics, soils and hydrological processes in varied climates* (pp. 565-584). Springer International Publishing. <https://research.wur.nl/en/publications/spatial-runoff-estimation-and-mapping-of-potential-water-harvesti>
- Monsalve Sáenz, G. (1995). *Hidrología en la ingeniería*. Editorial Educativa. Bogotá. Colombia.
- Ortega T., & Morales, C. (2002). Crecidas e inundaciones durante el invierno 2000-2001 en la ciudad de Valladolid y su entorno. *Investigaciones Geográficas (España)*, (27), 35-64. <https://doi.org/10.14198/INGEO2002.27.08>
- Rahman, B., Akmal, M., Muzaffarsyah, T., Muchlis, & Yunanda, R. (2024). *The effectiveness of flood management system in aceh*. *Revista De Gestão Social e Ambiental*, 18(6), 1-19. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n6-070>
- Romero, A., Guadalupe, E., & Blas, W. (2010). Estimado de descargas máximas en la microcuenca de Huaycoloro (Huachipa-Lima). *Rev. del Instituto de Investigación FIGMMG-UNMSM*, 13(25), 109-116. <https://shorturl.at/bErg5>
- Sánchez González, D. (2011). Precipitaciones extremas y sus implicaciones en procesos de remoción en masa en la planificación urbana de Tampico, México. *Cuadernos Geográficos*, 48, 135-159. <http://hdl.handle.net/10486/676670>
- Sarango, D., Velásquez, T., Rozas, G., & Gástelo, J. (2018). Estudio de máximas avenidas para la protección de zonas de posible inundación ubicada en el tramo La Oroya-40 km aguas abajo Cuenca del Río Mantaro. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 20(39), 27-38. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v20i39.14163>
- Urdiales, D., & Céleri, R. (2018). Forecasting of daily precipitation occurrence in an altitudinal gradient in southern Ecuador using a weather generator. *Enfoque UTE*, 9(3), 29-41. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n3.209>
- Velásquez, F., Cabrera, C., Alcántara, F., & Lucas, L. (2019). Pronóstico de precipitación sobre la cuenca aportante al embalse "La Esperanza" aplicando modelo climático HadCM3. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 22(43), 29-36. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v22i43.16683>
- Vélez Upegui, J. J., & Botero Gutiérrez, A. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. *Dyna*, 78(165), 58-71. <https://www.redalyc.org/pdf/496/49622372006.pdf>