

Universidad Autónoma "Juan Misael Saracho"
Secretaría de Investigación Científica y Extensión Universitaria
Departamento de Investigación, Ciencia y Tecnología DICYT

Revista Ventana Científica

Vol. 16, N° 27, junio 2026

ISSN 2305-6010 Impreso | ISSN 2415-2390 En línea

DOI: <https://doi.org/10.65558/k3h8r2n5c9ya>

2

ARTÍCULO DE
REVISIÓN

Zonificación de riesgo por inundación en ciudad de montaña: modelación hidrodinámica con swmm y criterios de peligrosidad actualizados para La Paz, Bolivia

Flood risk zoning in a mountain city: Hydrodynamic modeling using SWMM and updated hazard criteria for La Paz, Bolivia

Fecha de recepción: 27/04/2026 | Fecha de aceptación: 29/06/2026

Osinaga Torrez Dante Benjamín¹

¹ Ingeniero Civil, M. Sc.

Docente Facultad de Arquitectura, Artes, Diseño y Urbanismo
Universidad Mayor de San Andrés (UMSA)

ORCID: 0000-0002-9734-2108

Correspondencia del autor: dbosinaga@umsa.bo¹

La Paz - Bolivia

RESUMEN

El crecimiento urbano acelerado y la intensificación de eventos climáticos extremos incrementan la vulnerabilidad de las metrópolis andinas frente a inundaciones pluviales repentinas. La presente investigación analiza la tormenta catastrófica del 19 de febrero de 2002 en La Paz, Bolivia, donde precipitaron 41 mm en menos de tres horas —superando cuatro veces los promedios históricos del SENAMHI—, con un saldo de al menos 69 muertos y daños materiales de 10 millones de dólares. Mediante el modelo numérico EPA SWMM 5.2 se simuló el comportamiento hidráulico de 414 tramos de calles y avenidas en el casco central, integrando criterios actualizados de peligrosidad (2010-2026): calado máximo admisible, velocidad límite peatonal, estabilidad al vuelco y estabilidad al deslizamiento. Los resultados demuestran que la peligrosidad en La Paz está determinada predominantemente por la energía cinética del flujo superficial, con velocidades superiores a 3 m/s en el 10% de los tramos y valores máximos de 4.99 m/s en la Av. Ismael Montes, generando fuerzas de arrastre superiores a 600 N. Solo el 11% de los tramos superó el criterio de calado máximo de 0.30 m. Estos hallazgos configuran un aporte metodológico relevante para la hidrología urbana en ciudades de montaña de América Latina y confirman que el tirante es un factor secundario en topografías escarpadas.

PALABRAS CLAVE

SWMM, inundaciones urbanas, escorrentía superficial, riesgo por velocidad, estabilidad peatonal, hidráulica de calles, La Paz.

ABSTRACT

Accelerated urban growth and the intensification of extreme climatic events increase the vulnerability of Andean metropolises to sudden pluvial flooding. This research analyzes the catastrophic storm of February 19, 2002, in La Paz, Bolivia, where 41 mm of rainfall occurred in less than three hours —exceeding historical SENAMHI averages by four times— resulting in at least 69 deaths and material damage of 10 million dollars. Using the EPA SWMM 5.2 numerical model, the hydraulic behavior of 414 street and avenue sections in the central district was simulated, incorporating updated hazard criteria (2010-2026): maximum admissible water depth, pedestrian velocity limit, overturning stability, and sliding stability. Results demonstrate that hazard in La Paz is predominantly determined by flow kinetic energy, with velocities exceeding 3 m/s in 10% of sections and maximum values of 4.99 m/s on Av. Ismael Montes, generating drag forces exceeding 600 N. Only 11% of sections exceeded the 30 cm maximum depth criterion. These findings represent a relevant methodological contribution to urban hydrology in Latin American mountain cities and confirm that water depth is a secondary factor in steep topographies.

KEYWORDS

SWMM, urban flooding, overland flow, velocity-driven risk, pedestrian stability, street hydraulics, La Paz.

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones urbanas constituyen uno de los riesgos hidrometeorológicos más significativos tanto en términos económicos como humanos a nivel global. Según el Informe de Riesgos Mundiales 2023, los eventos de precipitación extrema afectan anualmente a más de 250 millones de personas y generan pérdidas económicas superiores a los 280 mil millones de dólares (Löw et al., 2023). En las ciudades de montaña, como La Paz, este riesgo adquiere particularidades específicas debido a la combinación de topografías escarpadas, cuencas de respuesta rápida y sistemas de drenaje diseñados bajo parámetros que no consideran la variabilidad climática actual (Yazdanfar & Sharma, 2015; Guerrero et al., 2018).

Un ejemplo trágico ocurrió el 19 de febrero de 2002, cuando una intensa célula convectiva provocó una granizada y lluvias torrenciales sobre la zona central de La Paz. En tan solo una hora, se registraron precipitaciones de 39.4 mm, cuatro veces mayores al promedio histórico del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). La acumulación de granizo obstruyó alcantarillas y sumideros, mientras que la inclinada topografía de la ciudad, situada entre los 3,200 y 4,100 msnm, favoreció un fuerte escurrimiento superficial con alta energía cinética. Este evento dejó como saldo al menos 69 fallecidos, 130 heridos, 50 personas desaparecidas y daños materiales estimados en 10 millones de dólares (PNUD-Bolivia, 2002; Hardy & IFEA, 2009).

El análisis sistemático de este suceso comenzó con la investigación realizada por Osinaga Torrez en 2011, quien empleó el modelo EPA SWMM 5.2 (Storm Water Management Model desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU.) para una simulación hidrodinámica centrada en la red vial del centro de La Paz. No obstante, los estándares de evaluación empleados en ese momento estaban basados en conocimientos disponibles de principios de la década del 2000. Durante los últimos quince años, las investigaciones científicas han aportado avances significativos en la definición de parámetros de riesgo para peatones durante inundaciones urbanas. Estudios como los de Martínez-Gomariz et al. (2016, 2019), Serna et al. (2019) y Corzo et al. (2024) señalan que la velocidad del flujo —más que la profundidad del agua— es el factor clave para determinar la peligrosidad en terrenos pronunciados.

Por otro lado, el cambio climático está alterando los patrones de precipitación en la región andina. Investigadores como Arnbjerg-Nielsen (2020) y Zhou et al. (2018) han evidenciado cómo la no-estacionariedad climática impone la necesidad de actualizar las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), ya que se prevé un aumento en la frecuencia e intensidad de tormentas convectivas cortas pero intensas, como el evento de 2002, en las próximas décadas. Además, Ramovha et al. (2024) subrayan que la acumulación de residuos sólidos en los sumideros es uno de los principales factores que desencadenan desastres urbanos en ciudades con ingresos bajos y medios, disminuyendo hasta en un 90% la eficiencia del drenaje durante los primeros minutos de precipitaciones intensas.

Este estudio tiene como propósito actualizar y ampliar el análisis original del evento extremo ocurrido en 2002, integrando criterios contemporáneos de peligrosidad vigentes entre 2010 y 2026 junto con simulaciones hidrodinámicas mejoradas. El objetivo es desarrollar una zonificación de riesgo basada en la dinámica real del flujo superficial en calles empinadas, proporcionando insumos para una planificación más eficiente de infraestructura de drenaje y sistemas de alerta temprana, tanto para La Paz como para otras ciudades andinas con características topográficas similares.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y características hidrológicas

La región central de la ciudad de La Paz se encuentra situada dentro de la cuenca del río Choqueyapu, emplazada en una depresión caracterizada por pendientes que exceden el 50%, con altitudes que oscilan entre los 3.200 y los 3.650 metros sobre el nivel del mar en el área de análisis. Este sector experimenta un clima árido, con una precipitación media anual de aproximadamente 540 mm, concentrada predominantemente entre los meses de diciembre y marzo. Además, la alta impermeabilidad de las superficies urbanas en el núcleo central alcanza más del 85%, lo que resulta en coeficientes de escorrentía próximos a la unidad, como se indica en estudios previos (Osinaga Torrez, 2011; Álvarez et al., 2021).

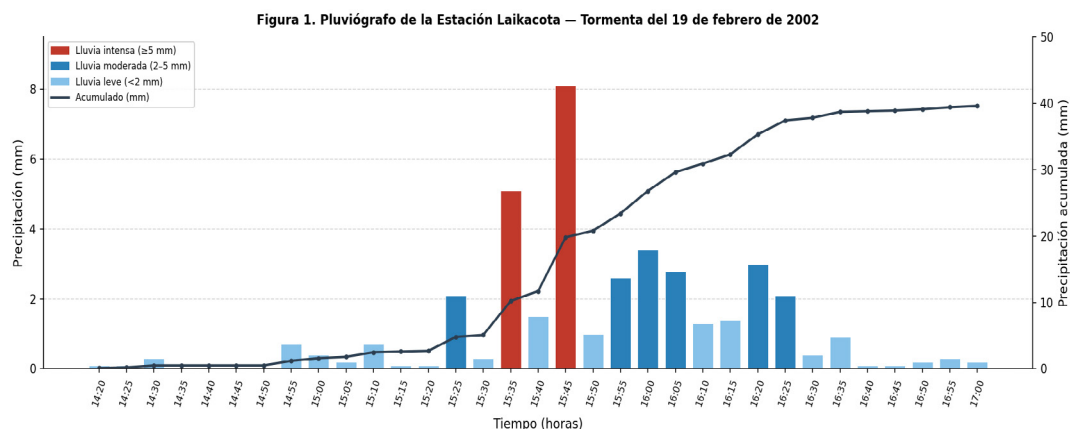
El sistema de drenaje en el área combina antiguas estructuras de embovedado que cubren el río Choqueyapu y sus afluentes con una red de alcantarillado de tipo combinado. Sin embargo, la capacidad diseñada para los dispositivos de captación superficial resulta insuficiente frente a tormentas con períodos de retorno mayores a diez años. Esta situación se ve exacerbada por la acumulación de residuos sólidos, que suelen bloquear las rejillas durante los primeros momentos de precipitaciones intensas, complicando aún más el manejo eficiente de las aguas pluviales (GAMLP, 2013).

2.2. Evento extremo: tormenta del 19 de febrero de 2002

La tormenta fue monitoreada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), registrándose una precipitación acumulada de 41 mm, de los cuales 39.4 mm se

concentraron en el intervalo comprendido entre las 14:20 y las 15:20 horas. A partir de los registros pluviográficos, se elaboró un hietograma de diseño empleando un intervalo temporal de 5 minutos (ver Figura 1). La intensidad máxima registrada, de 39.4 mm/h, supera en cuatro veces la intensidad típica de diseño, generalmente estimada entre 8 y 10 mm/h. La tormenta estuvo asociada con una célula convectiva que alcanzó una altura aproximada de 10 km y que se desplazó en dirección norte-sur sobre el área urbana de La Paz, generando una precipitación sólida en forma de granizo. Este fenómeno dificultó el acceso del escurrimiento hacia la red de captación, como señala Hardy y el Instituto Francés de Estudios Andinos (IFEA, 2009). Comparativamente, según los registros disponibles, el evento pluviométrico más similar en magnitud tuvo lugar en 1976, con un total de 32 mm; en este sentido, la tormenta del año 2002 presentó un incremento del 22% sobre dicho registro histórico.

Figura 1. Hietograma de la tormenta extrema del 19/02/2002, estación Laikacota, La Paz. La línea representa el volumen acumulado; las barras rojas indican el período de máxima intensidad



Fuente: Elaboración propia

2.3. Modelación hidrodinámica con EPA SWMM 5.2

El modelo empleado fue el Storm Water Management Model en su versión 5.2 (Rossman, 2010), diseñado para la resolución de las ecuaciones de Saint-Venant bajo condiciones de régimen dinámico. Esta herramienta de código abierto y estándar internacional fue elegida debido a su robustez computacional y su capacidad comprobada para modelar de forma dinámica el transporte de escorrentía superficial en entornos urbanos complejos. Este modelo incorpora el

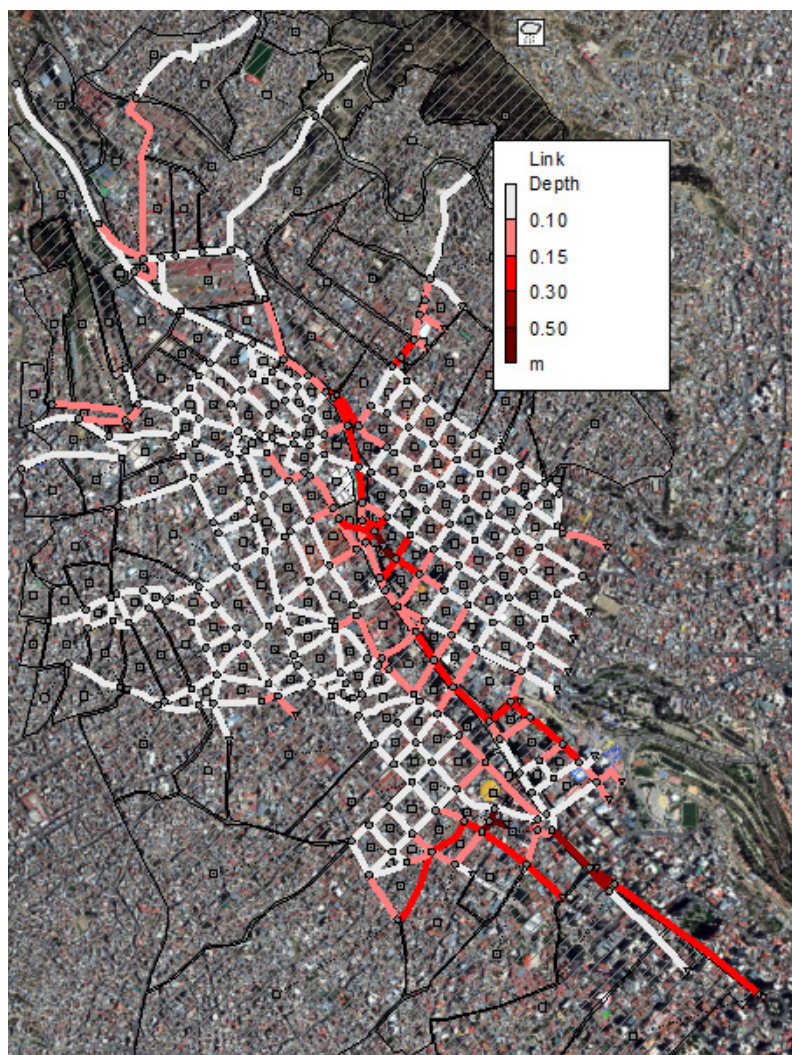
motor de Onda Dinámica, que posibilita la simulación detallada de fenómenos como los efectos de remanso, los flujos presurizados y la interacción entre la escorrentía superficial y la infraestructura del sistema de drenaje (Niazi et al., 2017). La red de estudio está conformada por un total de 414 tramos que incluyen calles y avenidas, mientras que las 219 subcuencas corresponden a bloques urbanos definidos por los límites de las manzanas. Asimismo, se incluyen los nodos de conexión ubicados en las intersecciones viales. Una síntesis de los parámetros utilizados en la modelación se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros principales de la modelación con EPA SWMM 5.2

Parámetro	Valor adoptado	Fuente/Referencia
Motor de cálculo	Onda Dinámica (Saint-Venant)	Rossman (2010)
Tramos modelados	414 calles y avenidas	Relevamiento topográfico GAMLP
Subcuencas urbanas	219 (equivalentes a manzanos)	Cartografía municipal 1:2000
Manning asfalto / concreto	$n = 0.015$ / $n = 0.013$	Chaudhry (2008)
Impermeabilidad	85% – 100%	Álvarez et al. (2021)
Número de curva (CN)	CN = 95 (área urbana consolidada)	Cronshey et al. (1986)
Paso de tiempo del hietograma	5 minutos	Registro SENAMHI 2002

Fuente: Elaboración propia en base a Referencias consultadas.

Figura 2. Rango de profundidad del agua



Fuente: Elaboración propia en base a resultados del EPA SWMM 5.2

2.4. Criterios de peligrosidad y zonificación del riesgo

La valoración de la peligrosidad asociada al flujo superficial en las calles se llevó a cabo utilizando cuatro criterios complementarios, los cuales han sido ajustados conforme a la literatura

científica internacional más reciente (ver Figura 3), abarcando el período 2010-2026, como se detalla en la Tabla 2. Estos parámetros constituyen una herramienta para analizar la seguridad de los peatones, tomando como base las variables hidráulicas generadas a partir de la simulación.

Tabla 2. Criterios de peligrosidad del flujo superficial en calles urbanas (actualizados 2010-2026)

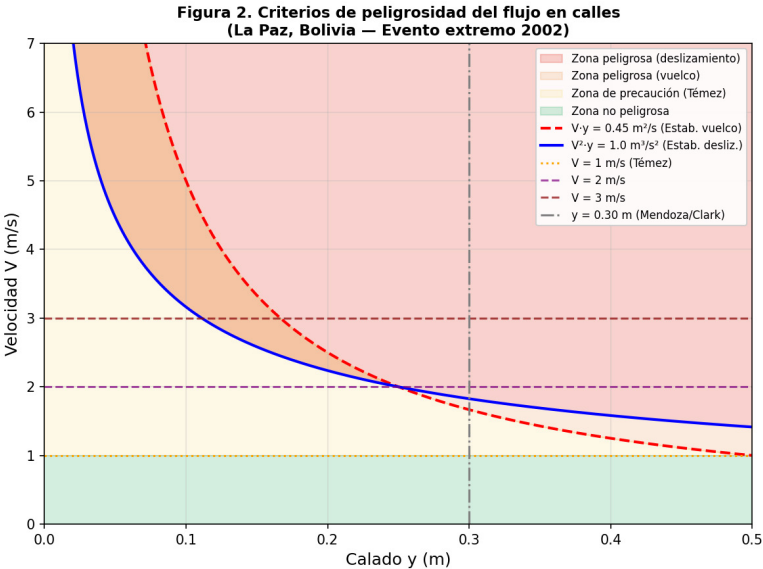
Criterio	Umbral de riesgo	Parámetro	Referencia
Calado máximo admisible (y)	$y \leq 0.30 \text{ m}$	Tirante hidráulico	Skrede et al. (2020); Témez (1978)
Velocidad límite peatonal (v)	$v \leq 2.0 \text{ m/s}$	Velocidad media	Martínez-Gomariz et al. (2016, 2019)
Estabilidad al vuelco ($y \cdot v$)	$y \cdot v \leq 0.50 \text{ m}^2/\text{s}$	Momento de vuelco	Serna et al. (2019); Skrede et al. (2020)
Estabilidad al deslizamiento ($y \cdot v^2$)	$y \cdot v^2 \leq 0.30 \text{ m}^3/\text{s}^2$	Fuerza de arrastre	Nanía (1999); Corzo et al. (2024)

Fuente: Elaboración propia en base a Referencias consultadas.

La zonificación del área de estudio distingue tres categorías principales: (i) Riesgo bajo, donde se observa un cumplimiento pleno de todos los criterios establecidos; (ii) Riesgo alto, caracterizado por el incumplimiento de al menos un criterio relacionado con la velocidad y un calado inferior a 0.30 m (ver Figura 2); y (iii) Riesgo muy alto, definido por la superación simultánea de los

umbrales asociados al vuelco o deslizamiento, lo que implica un riesgo significativo para la estabilidad del peatón. Esta clasificación se fundamenta en la propuesta metodológica desarrollada por Corzo et al. (2024) para su aplicación en contextos urbanos de América Latina con características topográficas complejas.

Figura 3. Diagrama V–y con zonas de peligrosidad según criterios hidráulicos aplicados. Las curvas delimitan la zona de inundación peligrosa (rojo) de la no peligrosa (verde)



Fuente: Elaboración propia en base a Referencias consultadas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

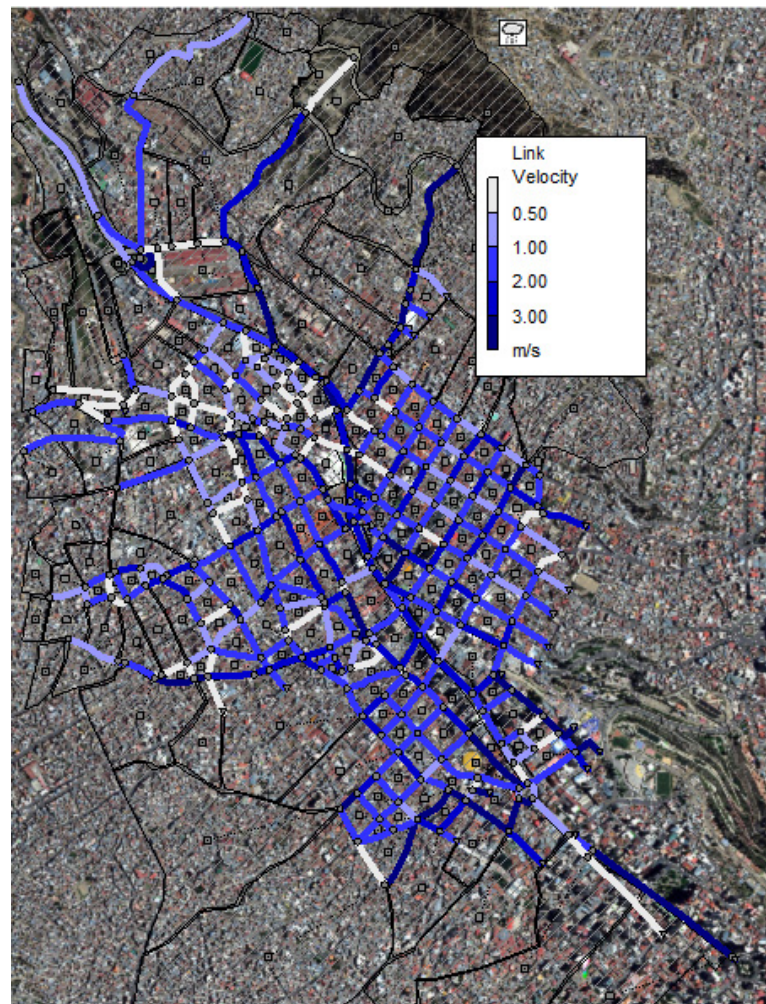
3.1. Dinámica temporal del evento y mecanismo de falla del sistema de drenaje

La simulación logró replicar con precisión la dinámica del evento ocurrido el 19 de febrero de 2002. El escurrimiento superficial comenzó a concentrarse en la red vial apenas 15 minutos después de iniciada la precipitación, a las 14:35 horas, alcanzando su punto máximo de peligrosidad entre las 15:52 y las 16:18. Durante este lapso crítico de 26 minutos, el sistema de drenaje superficial colapsó, no debido a una incapacidad estructural del embovedado subterráneo, sino a la falta de eficiencia de los sumideros que se encontraban obstruidos por granizo y residuos sólidos. Esta condición obligó a que todo el flujo superficial se desplazara directamente por

las calles, según lo registrado por Li (2024) y Ramovha et al. (2024).

Este tipo de falla, conocido como “by-pass de sumidero”, es típico de tormentas convectivas con presencia de granizo en ciudades que presentan una gestión inadecuada de residuos sólidos. Durante los primeros 15 minutos de la tormenta, la acumulación progresiva de obstrucciones redujo entre un 70 % y un 90 % la eficiencia del sistema de captación, redirigiendo el flujo hacia la superficie. Ramovha et al. (2024) han documentado procesos semejantes en otras ciudades de ingresos medios tanto en América Latina como en África Subsahariana. Esto permite ubicar el evento registrado en La Paz en 2002 dentro de un patrón global verificable y reproducible en contextos similares, especialmente ante escenarios asociados al cambio climático.

Figura 4. Rango de Velocidades



Fuente: Elaboración propia en base a resultados del EPA SWMM 5.2

3.2. Distribución espacial de la peligrosidad por velocidad del flujo

En el análisis de 414 tramos de calles y avenidas, la distribución de la peligrosidad basada en la velocidad del flujo superficial en el momento de mayor intensidad se detalla en la Tabla 3 (ver Figura 4 también). Se encontró que el 72% de

los tramos (298 calles) presentó velocidades superiores a 1 m/s durante el pico del evento, lo que, según el criterio biomecánico de Martínez-Gomariz et al. (2016), compromete la estabilidad de los peatones. Además, un 10% de los tramos (42 calles) registró velocidades iguales o superiores a 3 m/s, superando todos los umbrales de seguridad establecidos.

Tabla 3. Distribución de tramos por categoría de velocidad máxima

Categoría de velocidad	Nº de tramos	Porcentaje (%)	Nivel de riesgo
$v < 1.0$ m/s	116	28	Bajo
$1.0 \leq v < 2.0$ m/s	157	38	Medio
$2.0 \leq v < 3.0$ m/s	99	24	Alto
$v \geq 3.0$ m/s	42	10	Muy alto / Peligro extremo

Fuente: Elaboración propia.

Las velocidades máximas absolutas observadas oscilaron entre 3.33 y 4.99 m/s, asociadas a tramos con pendientes longitudinales que varían entre el 15% y el 35%. Estos valores corresponden a números de Froude (Fr) en el rango de 1.9 a 2.8, indicando un régimen hidráulico rápido con la capacidad de generar ondas de choque en las intersecciones. Este fenómeno, según Nanía (1999), aumenta considerablemente la fuerza de arrastre ejercida sobre peatones y vehículos.

3.3. Tramos de peligrosidad extrema: identificación y análisis

La Tabla 4 muestra los tramos que presentan las condiciones de peligrosidad más graves, determinados mediante la combinación de los cuatro criterios de análisis de peligrosidad. Estos segmentos están localizados en los ejes viales con mayor pendiente dentro del casco central, funcionando como colectores naturales del escurrimiento que desciende desde las laderas circundantes. Son, por tanto, las áreas con mayor probabilidad de registrar pérdidas humanas en eventos de esta naturaleza.

Tabla 4. Tramos de peligrosidad extrema ($v \geq 3.0$ m/s) en el casco central de La Paz

Vía principal	Pendiente (%)	Velocidad máx. (m/s)	Duración riesgo (min)	Criterios incumplidos
Av. Ismael Montes (desde Ingavi)	28-32	4.99	47	v , $y \cdot v$, $y \cdot v^2$
Av. Mariscal Santa Cruz (Yanacocha)	22-26	4.32	45	v , $y \cdot v$, $y \cdot v^2$
Calle Potosí (eje central)	18-22	3.89	38	v , $y \cdot v$
Calle Federico Zuazo	15-18	3.72	32	v , $y \cdot v$
Calle Comercio (tramo norte)	12-15	3.52	28	v , $y \cdot v$

Fuente: Elaboración propia.

En la avenida Ismael Montes, se determinó que la velocidad máxima de 4.99 m/s excede en 2.5 veces el límite considerado de alto riesgo. A esta velocidad, la fuerza de arrastre que puede experimentar un peatón de 70 kg supera los 600 N (Martínez-Gomariz et al., 2019), un nivel que sobrepasa la resistencia biomecánica que un adulto promedio puede soportar en condiciones normales. Estos datos concuerdan con el elevado número de víctimas fatales registradas en esa área durante el evento ocurrido en 2002.

3.4. El riesgo por calado: factor secundario en ciudades de montaña

A diferencia de las ciudades ubicadas en llanuras, en La Paz únicamente el 11 % de los tramos analizados (equivalente a 46 calles) superaron el umbral de calado máximo de 0.30 metros. Esta baja incidencia se debe principalmente a la pendiente pronunciada de su sistema vial, la cual impide la acumulación de agua y acelera su flujo. Este hallazgo tiene una implicancia normativa clave: utilizar criterios de evaluación de riesgo diseñados para ciudades planas en el contexto paceño podría llevar a una grave subestimación de la verdadera peligrosidad. En este caso, el riesgo predominante está asociado con la energía cinética ($\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$), capaz de generar fuerzas de arrastre considerables incluso con calados menores a 0.15 metros, siempre que la velocidad del agua supere los 3 metros por segundo (Serna et al., 2019; Skrede et al., 2020).

3.5. Comparación con estudios internacionales en ciudades de montaña

Los resultados obtenidos para La Paz son similares a los reportados por Corzo et al. (2024) en Cúcuta, Colombia, una ciudad andina donde el 65% de la red vial experimentó velocidades superiores a 2 m/s durante una tormenta con un período de retorno (TR) de 25 años. Sin embargo, la diferencia radica en que La Paz tiene pendientes promedio más pronunciadas (8-35% frente a 2-15% en Cúcuta), lo que explica las velocidades mayores. Por su parte, Serna et al. (2019), en estudios realizados en Manizales, indicaron que el criterio $y \cdot v^2 > 0.30 \text{ m}^3/\text{s}^2$ fue superado en más del 80% de los tramos durante tormentas con TR de 10 años. En el caso de La Paz, durante el evento de 2002 (con un TR estimado superior a 50 años), este mismo criterio fue sobrepasado en el 62% de los tramos.

Por otro lado, en ciudades europeas como Barcelona, Martínez-Gomariz et al. (2019) registraron velocidades máximas entre 1.5 y 2.5 m/s en áreas de alto riesgo durante tormentas con un TR de 100 años. En comparación, en La Paz, valores similares se alcanzaron en el 38% de los tramos durante la tormenta de 2002. Esta diferencia resalta la necesidad imperante de desarrollar metodologías específicas adaptadas a las características únicas de las ciudades montañosas latinoamericanas.

3.6. Cambio climático y no-estacionariedad: escenarios futuros para La Paz

La creciente no-estacionariedad del clima exige una revisión profunda de los enfoques utilizados para el diseño del drenaje urbano en la ciudad de La Paz. Según Arnbjerg-Nielsen (2020), en ciudades ubicadas en montañas tropicales, las intensidades de precipitación asociadas a un período de retorno (TR) de 10 años podrían aumentar entre un 15% y un 30% hacia 2050 bajo los escenarios planteados por el RCP 4.5. Por su parte, Zhou et al. (2018) estiman que el volumen de escorrentía urbana en ciudades del altiplano andino podría incrementarse hasta en un 45% durante el período 2041-2070. Si la intensidad máxima del evento pluviométrico ocurrido en 2002 aumentara un 20%, las velocidades en los tramos más críticos de la Av. Ismael Montes superarían los 6 m/s, con la capacidad de arrastrar vehículos de más de 1.500 kg. Este panorama evidencia la necesidad urgente de actualizar los manuales de diseño hidráulico en Bolivia y promover la implementación de sistemas eficaces de alerta temprana.

3.7. Zonificación de riesgo y medidas de mitigación

Basándose en los resultados obtenidos y los criterios revisados, se propone una zonificación del casco central de La Paz en tres categorías de riesgo diferenciadas. La Zona de Riesgo Muy Alto incluye los ejes viales con pendientes superiores al 15%, como las avenidas Ismael Montes y Mariscal Santa Cruz, así como el tramo norte de la calle Potosí, donde se registran velocidades superiores a 3 m/s que se mantienen entre 28 y 47 minutos, además de superar simultáneamente los cuatro criterios de peligrosidad establecidos.

La Zona de Riesgo Alto comprende tramos con pendientes de entre el 8% y el 15%, velocida-

des de flujo de 2 a 3 m/s y un incumplimiento de los criterios relacionados con velocidad y vuelco, representando el 24% del total de los tramos analizados. En cuanto a la Zona de Riesgo Medio y Bajo, incluye áreas con pendientes inferiores al 8%, donde en ciertos puntos bajos puede haber acumulaciones de agua superiores a los 0.30 metros, aunque las velocidades de flujo permanecen por debajo de los 2 m/s.

Para mitigar el riesgo en las áreas catalogadas como Zona Roja, la literatura especializada sugiere una serie de medidas combinadas, según estudios recientes (Altobelli et al., 2020; Qiu, 2021). Estas medidas incluyen:

- a. Instalación de disipadores de energía hidráulica en la calzada, como deflectores transversales, que han demostrado ser efectivos en reducir velocidades en hasta un 35% en estudios realizados en ciudades colombianas (Serna et al., 2019).
- b. Construcción de micro-presas de retención en subcuencas ubicadas en laderas, con el objetivo de incrementar el tiempo de concentración y reducir la cantidad de escorrentía que llega al área central.
- c. Uso de sumideros de alta capacidad equipados con filtros anti-obstrucción, diseñados específicamente para mantener su eficiencia durante eventos extremos, como precipitaciones acompañadas de granizo.
- d. Instalación de sistemas de alerta temprana basados en sensores que monitoreen la lluvia y el caudal, permitiendo activar protocolos de evacuación dentro del margen crítico identificado de 26 minutos (Wang et al., 2020).

4. CONCLUSIONES

En La Paz, el principal factor de peligro asociado a las inundaciones urbanas es la alta energía cinética del flujo superficial, más que la profundidad del agua. Se constató que el 72% de los tramos evaluados superaron la velocidad peatonal segura de 1 m/s, el 10% alcanzó velocidades iguales o superiores a 3 m/s, mientras que solo el 11% sobrepasó una profundidad de 0.30 m, considerada crítica. Esta situación se debe a la accidentada topografía de la ciudad, lo que diferencia su dinámica de riesgo frente a la de ciudades ubicadas en zonas planas. Los resultados de esta investigación demuestran que los criterios normativos vigentes, fundamentados exclusivamente en el calado (tirante hidráulico), resultan insuficientes para entornos urbanos de

montaña. En estos escenarios de alta pendiente, la energía cinética se posiciona como el factor determinante y el principal indicador de riesgo hidrodinámico, por lo que debe ser incorporada de forma obligatoria en las metodologías de diseño futuras y actualizar los manuales nacionales de diseño hidráulico en Bolivia.

La principal causa del fallo en el sistema de drenaje fue la obstrucción masiva de los sumideros por acumulación de granizo y residuos sólidos, desviando todo el caudal superficial hacia las calzadas durante 26 minutos críticos. Este factor debe ser integrado explícitamente en los modelos de evaluación de riesgos y en los planes de mantenimiento preventivo del sistema de drenaje. Por lo tanto, se recomienda formalmente la articulación vinculante entre los planes de drenaje pluvial y los programas de aseo urbano. Asimismo, es imperativo establecer protocolos de mantenimiento preventivo intensivo con anterioridad al inicio del periodo estacional de precipitaciones para garantizar la capacidad operativa de la infraestructura.

Las arterias viales con mayor nivel de peligro son la Avenida Ismael Montes, donde se alcanzaron velocidades máximas de 4.99 m/s y el período crítico de riesgo fue de 47 minutos, y la Avenida Mariscal Santa Cruz, con velocidades de hasta 4.32 m/s y una duración de riesgo de 45 minutos. Es prioritario implementar allí medidas como disipadores de energía, sistemas de alerta temprana y restricciones al tránsito peatonal durante eventos extremos.

Las proyecciones relacionadas con el cambio climático sugieren que, a mediano plazo, el evento extremo ocurrido en 2002 podría repetirse con mayor frecuencia e incluso con mayor intensidad. Hacia 2050 se prevén incrementos entre el 15% y el 30% en la intensidad de lluvias severas. Ante este panorama, es crucial actualizar las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) considerando la no estacionariedad e incorporar parámetros que contemplen la estabilidad biomecánica peatonal en los manuales bolivianos de diseño hidráulico.

La metodología utilizada en este análisis, que incluye simulaciones con el modelo SWMM calibrado con datos reales, evaluación bajo criterios modernos de peligrosidad y zonificación espacial del riesgo, es altamente adaptable a otras ciudades andinas con características similares en Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú. En estas urbes, la energía cinética asociada al flujo urbano ha sido históricamente subestimada,

requiriendo una atención más exhaustiva para mejorar su gestión y mitigar los riesgos relacionados.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Altobelli, M., Cipolla, S. S., & Maglionico, M. (2020). Combined Application of Real-Time Control and Green Technologies to Urban Drainage Systems. *Water*, 12(4), 1128. <https://doi.org/10.3390/w12041128>
- Álvarez, C., Mazurek, H., Rojo Gómez, J., et al. (2021). Climate Change Vulnerability Index in the City of La Paz, Bolivia. *Climate*, 9(6), 93.
- Arnbjerg-Nielsen, K. (2020). Panta Rhei - Non-stationarity in Planning, Designing and Operating Urban Drainage Systems. *Hydrological Sciences Journal*, 65(9), 1413-1423.
- Chaudhry, M. H. (2008). *Open Channel Hydraulics* (2nd ed.). Springer, Nueva York.
- Corzo, G., Sánchez Tapiero, D. I., et al. (2024). Development of a Hazard Risk Map for Assessing Pedestrian Risk in Urban Flash Floods: A Case Study in Cúcuta, Colombia. *Journal of Flood Risk Management*, 17(1), e12943.
- Cronshey, R., et al. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds (TR-55)*. USDA, Soil Conservation Service, Washington D.C.
- Gobierno Autónomo Municipal de La Paz (GAMLP). (2013). *Plan de Drenaje Urbano de La Paz*. GAMLP – Secretaría Municipal de Infraestructura Pública, La Paz.
- Guerrero, F., Mena, A., & Hidalgo, P. (2018). Urban Flooding Risk Assessment for Andean Mountain Cities. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(7), 2045-2060.
- Hardy, S., & Institut Français d'Études Andines (IFEA). (2009). *Granizada e Inundación del 19 de Febrero de 2002*. IFEA, La Paz, Bolivia.
- Li, X. (2024). Debris Clogging and Hydraulic Performance of Urban Inlets during Intense Rainfall Events. *Urban Water Journal*, 21(3), 215-228.
- Löw, P., et al. (2023). *Natural Disaster Statistics 2022*. Munich Re, Munich, Alemania.
- Martínez-Gomariz, E., Gómez, M., & Russo, B. (2016). Experimental Study of the Stability of Pedestrians Exposed to Urban Pluvial Flooding. *Natural Hazards*, 82(3), 1949-1967.
- Martínez-Gomariz, E., Gómez, M., Russo, B., & Djordjević, S. (2019). Stability Criteria for Flooded Vehicles: A State-of-the-Art Review. *Journal of Flood Risk Management*, 12(S2), e12480.
- Nanía, L. S. (1999). *Metodología Numérico-Experimental para el Análisis del Riesgo Asociado a la Escorrentía Pluvial en una Red de Calles*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Niazi, M., et al. (2017). Storm Water Management Model: Performance Review and Gap Analysis. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 3(2), 04017002.
- Osinaga Torrez, D. B. (2011). *Simulación de la Inundación de la Zona Central de la Ciudad de La Paz por una Tormenta Extrema para la Identificación de Zonas de Alto Riesgo*. Trabajo Final de Máster Oficial en Hidrología y Gestión del Agua, Universidad Politécnica de Cataluña.
- PNUD & GMLP. (2002). *De la Emergencia a la Reconstrucción: Informe-Evaluación a Tres Meses de la Tragedia*. PNUD, La Paz, Bolivia.
- PNUD-Bolivia. (2002). *Marco Estratégico para Reconstrucción PNUD: Estrategia de Gestión de Riesgos – Documento Propuesta*. PNUD, La Paz, Bolivia.
- Qiu, J. (2021). Nature-Based Solutions for Urban Stormwater Management: A Systematic Review. *Environmental Science & Policy*, 119, 70-82.
- Ramovha, L., et al. (2024). Solid Waste Blockage of Urban Drainage Systems during Storm Events in Sub-Saharan Africa and Latin America. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 102, 104278.
- Rossman, L. A. (2010). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.2*. EPA/600/R-05/040, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati.
- Serna, C. F., Cárdenas-Quintero, M., & Marbello, R. V. (2019). Análisis Hidrodinámico Bidimensional del Drenaje Superficial en una Vía Urbana. *DYNA*, 86(210), 106-115.

- ✎ Skrede, I., Sivertsen, E., & Birkeland, Ø. (2020). Pedestrian Stability in Flooded Streets: Experimental Testing of the Moment Criterion. E3S Web of Conferences, 195, 03021.
- ✎ Témez, J. R. (1978). Cálculo Hidrometeorológico de Caudales Máximos en Pequeñas Cuencas Naturales. Dirección General de Carreteras, Madrid, España.
- ✎ Wang, Y., Liu, P., Chu, S., et al. (2020). Research on the Disaster Bearing Characteristics System and Capacity Depth Disaster Response Curves in Urban Underground Spaces. Safety Science, 128, 104762.
- ✎ Yazdanfar, Z., & Sharma, A. (2015). Urban Drainage System Planning and Design – Challenges with Climate Change and Urbanisation. Water Science and Technology, 72(2), 165-179.
- ✎ Zhou, Q., Leng, G., & Huang, M. (2018). Impacts of Future Climate Change on Urban Flood Volumes in Hohhot in Northern China: Benefits of Adaptation. Hydrology and Earth System Sciences, 22(1), 305-316.