

DOI: 10.35319/acta-nova.202535

ACTA NOVA Revista de Ciencias y Tecnología

¹ Carrera de Biología, Facultad de Ciencias Puras y Naturales, Universidad Mayor de San Andrés, Campus Universitario, c/27 Cota Cota, La Paz, Bolivia

² Colección Boliviana de Fauna, Instituto de Ecología, Carrera de Biología, Facultad de Ciencias Puras y Naturales, Universidad Mayor de San Andrés

Autor para correspondencia:

Jazmín Lahor-Sillerico

jazminlahorsillerico@gmail.com

Potencial de captación pluvial y su impacto en la gestión hídrica y reducción de riesgos en la ciudad de La Paz

Rainwater harvesting potential and its impact on water management and risk reduction in the city of La Paz

Jazmín Lahor-Sillerico¹, Francisco Forno Medeiros¹, Daire L. Lafuente¹, Gabriel Lara-Alandia¹, Rosario Limachi¹, Luis E. Soliz¹, María J. Zeballos¹ y Luis F. Pacheco²

Resumen: La ciudad de La Paz enfrenta una creciente presión sobre sus sistemas de abastecimiento de agua potable y evacuación pluvial, agravada por la expansión urbana desordenada y la mayor frecuencia de eventos climáticos extremos. Este estudio evalúa, desde una perspectiva teórica, el potencial de captación pluvial desde techos urbanos como una estrategia complementaria de gestión hídrica y reducción de riesgos. Mediante imágenes satelitales y datos de precipitación, se estimó una captación teórica y bajo condiciones ideales (distribución uniforme de la lluvia en macrodistritos, homogeneidad en características de techos, sin pérdidas por escurrimiento, evaporación, filtraciones o rebalses) de 13,4 millones de m³ año⁻¹ para la ciudad; y de aproximadamente 11,4 millones de m³ año⁻¹, si consideramos pérdidas de hasta un 15%. Este volumen representa potencialmente hasta el 52 % de la capacidad total de las represas que abastecen actualmente a La Paz. En términos económicos, se calcula un ahorro potencial superior a 24 millones Bs año⁻¹, con beneficios directos para los hogares, que podrían facilitar la inversión en sistemas de almacenamiento domiciliario. Además, se analiza la capacidad del sistema propuesto para mitigar escurrimientos urbanos durante lluvias intensas. Los resultados sugieren que la captación pluvial urbana es una alternativa viable y alineada con principios de resiliencia climática urbana.

Palabras clave: Captación pluvial, gestión hídrica, gestión de riesgos, resiliencia.

1. Introducción

El acceso al agua potable es uno de los mayores retos de la humanidad actualmente, pues su escasez afecta a más de cuatro mil millones de personas en el mundo (Hope 2024). A nivel global, las ciudades enfrentan una creciente

Abstract: The city of La Paz is facing increasing pressure on its potable water supply and stormwater disposal systems, exacerbated by uncontrolled urban expansion and the increased frequency of extreme weather events. This study evaluates, from a theoretical perspective, the potential for rooftop rainwater harvesting as a complementary water management and risk reduction strategy. Using satellite imagery and precipitation data, a theoretical rainwater harvesting potential was estimated under ideal conditions (uniform distribution of rainfall in macrodistricts, homogeneous roof characteristics, and no losses due to runoff, evaporation, filtration, or overflows) of 13.4 million m³ year⁻¹ for the city; and approximately 11.4 million m³ year⁻¹ if losses of up to 15% are considered. This volume potentially represents up to 52% of the total capacity of the dams currently supplying La Paz. In economic terms, potential savings of over 24 million Bs year⁻¹ are estimated, with direct benefits for households, which could facilitate investment in home storage systems. In addition, the proposed system's capacity to mitigate urban runoff during heavy rainfall is analyzed. The results suggest that urban rainwater harvesting is a viable alternative aligned with urban climate resilience principles.

Key words: Rainwater harvesting, water management, risk management, resilience.

demanda de agua potable (Benavides-Muñoz, 2024; Iwakin y Moazeni, 2024) y una vulnerabilidad cada vez mayor a eventos climáticos extremos (Zapperi y Montico, 2022), lo que destaca la importancia de desarrollar sistemas que refuercen el suministro convencional. En dicho escenario, la captación de agua de lluvia funciona como una alternativa de gestión hídrica, que ofrece

múltiples beneficios en términos de abastecimiento y control de riesgos hídricos (Pacheco, 2010; Roblero-Hidalgo y Flores-Velásquez, 2022).

La recolección de agua de techos urbanos puede disminuir la presión sobre los sistemas de abastecimiento en épocas de sequía y reducir el escurrimiento superficial, el cual aumenta el riesgo de inundaciones en temporadas de lluvia (Ortiz y Velandia, 2017). Los sistemas de captación de agua de lluvia permiten aprovechar el agua en un entorno controlado, promoviendo un uso eficiente del recurso mediante su recolección, almacenamiento y aplicación en actividades que no requieren agua potable, como el riego y el saneamiento (FAO, 2013).

Para cuantificar el potencial de acumulación de agua de lluvia es necesario estimar el área total de techos en una determinada zona. Para esto, se puede recurrir a una variedad de métodos de análisis espacial, algunos de los cuales incluyen imágenes satelitales de Google Earth Pro, datos de fotogrametría aérea e incluso herramientas de modelado 3D (Kordana y Szoltysik, 2016). Estos métodos permiten identificar, clasificar y cuantificar áreas urbanas desde una perspectiva aérea, lo que proporciona estimaciones sobre la superficie cubierta por techos. Al combinar la superficie de los techos con datos existentes de precipitación, es posible calcular el potencial de captación, generando una herramienta muy útil para la gestión hídrica urbana (Graham, 2017).

2. Planteamiento del problema

A pesar de los beneficios ampliamente reconocidos de la captación de agua pluvial, su implementación en contextos urbanos, como el de La Paz, sigue siendo limitada. La expansión desordenada de la mancha urbana (Gobierno Autónomo Municipal de La Paz, 2020a) aumenta la presión sobre la infraestructura hídrica y de evacuación de agua. A ello se suman eventos extremos recientes, como las sequías de 2016 y 2017, que comprometieron el abastecimiento de agua (Perales Miranda, 2018), y las inundaciones por rebalse de ríos de la ciudad durante lluvias intensas (Agencia de Notificas Fides, 2024) que muestran la vulnerabilidad del sistema actual; especialmente en las laderas y periferias de la ciudad, donde los desafíos son mayores (CDC-UNASUR, 2015) y se requiere fortalecer la gestión hídrica y de riesgos. Los sistemas urbanos de drenaje, que incorporan procesos naturales mediante pavimentos permeables, techos verdes y jardines de lluvia, son potencialmente capaces de reducir el flujo pico y las inundaciones (Stohmann Aguirre, 2022), aumentando la resiliencia urbana.

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo general evaluar el potencial de captación de agua de lluvia

a nivel domiciliario, como una medida complementaria para la gestión hídrica en la ciudad de La Paz. Para ello, se plantearon los siguientes objetivos específicos: i) Estimar el volumen anual de agua que podría recolectarse mediante un sistema domiciliario de captación de agua de lluvia; ii) Estimar el ahorro potencial en términos de volumen y costo, tanto para una familia promedio, como para la ciudad en su conjunto; y iii) Evaluar, de forma preliminar, la contribución del sistema propuesto a reducir el riesgo asociado a precipitaciones intensas.

3. Sustento teórico

3.1 Captación pluvial

La captación de agua pluvial desde techos constituye una estrategia efectiva y prioritaria para el abastecimiento doméstico, especialmente en contextos rurales, debido a sus características de impermeabilidad e inclinación que permiten una escorrentía que se aproxima al volumen total de la lluvia, lo que facilita su conducción hacia sistemas de almacenamiento (FAO, 2013). Un sistema típico de captación requiere un techo limpio y liso, canaletas con pendiente adecuada para la conducción del agua, desagües para sedimentos y filtros metálicos que retienen detritos (FAO, 2013). No obstante, su funcionamiento depende también de contar con tanques de almacenamiento y mecanismos de reutilización, lo cual implica inversión y condiciones técnicas específicas. También es necesario tomar en cuenta que la calidad del agua recolectada dependerá del material utilizado, su mantenimiento y condiciones ambientales (García-Ávila *et al.* 2023). En ciudades como La Paz, donde una gran parte de la población urbana utiliza techos de calamina, y losa de hormigón (GAML, 2020b), no todas las viviendas serán técnicas o económicamente aptas para implementar estos sistemas. Por ello, es clave considerar la superficie de techo disponible como un factor determinante para su viabilidad. Nuestro aporte es en el cálculo del potencial de recolección, pero un proyecto a nivel de factibilidad sería necesario para hacerlo operativo.

3.2 Gestión hídrica

Según Martínez Valdés y Villalejo García (2018), la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) representa el enfoque predominante en la administración del agua a nivel global, con el propósito central de promover una visión holística e intersectorial en el manejo del agua. Esta forma de gestión busca equilibrar el desarrollo económico y social con la conservación de los ecosistemas, orientando así la formulación de políticas públicas en torno al recurso hídrico. En este sentido, la Defensoría del Pueblo del Estado Plurinacional de Bolivia (2024) maneja el término Gobernanza del agua, referido al proceso de

toma de decisiones mediante el cual un estado, organización o grupo de personas gestionan demandas y respuestas en ámbitos económicos, políticos, jurídicos y medioambientales, con el objetivo de implementar políticas públicas a través de planes, programas y proyectos que beneficien tanto al Estado como a la sociedad. Así, la gobernanza es clave para lograr una gestión hídrica integrada que responda a los desafíos actuales y futuros del recurso agua.

3.3 Gestión de riesgos

La gestión de riesgos, bajo el concepto unificador de Guerrero-Aguilar *et al.* (2020), es el proceso sistemático para identificar, evaluar y controlar los riesgos que pueden afectar el logro de objetivos, buscando minimizar sus impactos negativos y aprovechar las oportunidades que surjan. La gestión de riesgos comienza con identificar y evaluar las posibles amenazas y vulnerabilidades que pueden afectar a sistemas importantes; esta evaluación busca entender qué tan probable es que ocurra un evento peligroso y qué daños podría causar a las personas, infraestructuras y al medio ambiente. Para hacerlo bien, se debe analizar dónde están los riesgos, qué tan intensos y frecuentes son, y cómo las condiciones físicas, sociales y económicas pueden aumentar la vulnerabilidad del sistema en estudio; además de revisar qué capacidades existen para enfrentar y recuperarse de estos riesgos (Arteaga Galarza y Ordóñez Arízaga, 2019). En nuestro caso, analizamos de forma preliminar la reducción del riesgo de torrenceras resultado de lluvias intensas, mediante la colecta de agua a nivel domiciliario, con el mismo sistema propuesto.

4. Métodos

4.1 Área de interés

El área de interés abarca los macrodistritos urbanos del municipio de La Paz: Cotahuma, Max Paredes, Periférica, San Antonio, Sur, Mallasa y Centro. Al norte, limitan con los distritos rurales de Hampaturi y Zongo, mientras que al oeste colindan con el Municipio de El Alto. Estos macrodistritos concentran la mayor parte de la población urbana y son el principal escenario en los procesos de planificación y gestión municipal (Fig. 1; GAMLP, 2023b)

4.2 Métodos

Para cuantificar el área de captación de agua de techos de la ciudad de La Paz utilizamos *Google Earth Pro*, con imágenes satelitales de mayo de 2024, trabajando a una altitud del ojo de 100 m, lo que permitió identificar y delimitar manualmente las superficies techadas en cada macrodistrito. La forma de obtener y tratar los datos se

esquematiza en la Fig. 2. Cabe destacar que no se trabajó en los macrodistritos de Hampaturi y Zongo, por ser mayormente rurales (con muy poca superficie techada). Se tuvo cuidado de excluir parcelas en las áreas protegidas municipales, para no subestimar la superficie techada; por lo cual, al ser grandes extensiones de área verde, no se las tomó en cuenta al momento de calcular el área techada de cada macrodistrito.

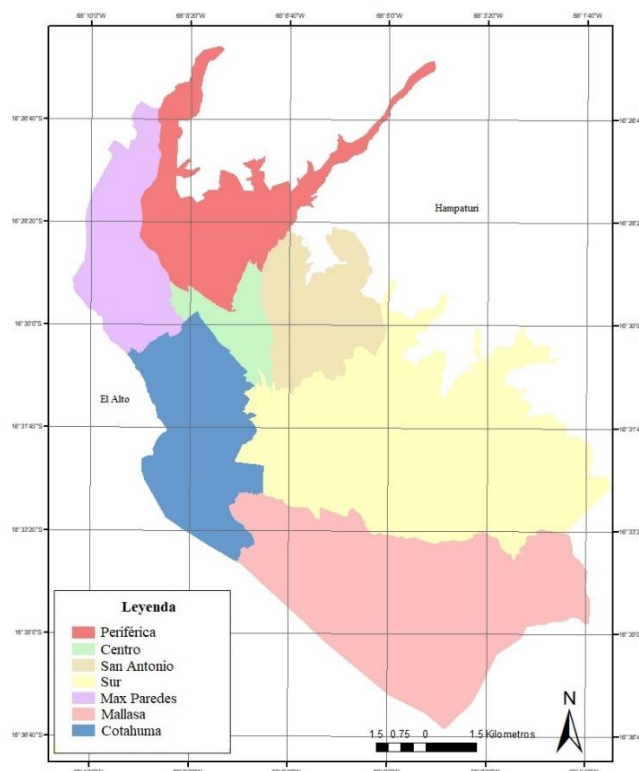


Figura 1. Macrodistritos urbanos del Municipio de La Paz. Fuente: Elaboración propia

Para cada uno de los siete macrodistritos de la ciudad, se cuantificó el total techado en 20 parcelas de 1 ha, ubicadas al azar. En cada una de ellas, se delimitó manualmente el área techada mediante la creación de polígonos sobre cada vivienda visible en imágenes satelitales. A partir de estos polígonos, se calculó el área total techada por parcela, y posteriormente se estimó un promedio de superficie techada por macrodistrito, según la fórmula 1.

Formula 1: Área techada por macrodistrito

$$\begin{aligned} \text{Área techada por macrodistrito (m}^2\text{)} \\ &= \text{Promedio de Techos (m}^2 \text{ ha}^{-1}\text{)} \\ &\quad * \text{Área Macrodistrito (ha)} \end{aligned}$$

Con datos de precipitación anual (promedio de 30 años), considerando diferencias entre la zona central y la zona sur (Miranda *et.al.* 2015), se estimó el volumen de agua que puede ser captado por los techos de las viviendas.

Para ello se multiplicó la superficie total techada (m²) por la precipitación anual (Fórmula 2). Para los macrodistritos Sur y Mallasa se utilizó una precipitación de 596 mm (0,596 m), mientras que para los otros macrodistritos se usó una precipitación anual de 550 mm (0,550 m); ambos datos obtenidos de Miranda *et.al.* (2015). Se consideró la precipitación anual para tener el dato de toda el agua que se pueda captar en el año. Este cálculo supone una distribución uniforme de la lluvia dentro de cada macrodistrito, así como homogeneidad en las características de los techos. No utilizamos un coeficiente de escurrimiento (i.e Pantoja Rico *et al.* 2022), debido a

que este depende de variables como material, inclinación o estado del techo, las cuales no pudieron ser determinadas a la escala del análisis. Además, se asumió la ausencia de pérdidas por evaporación, fugas o rebalses, por lo que los valores obtenidos representan un potencial teórico máximo. Sin embargo, aplicamos un factor de cautela de 15% (reduciendo nuestro resultado final) que debería cubrir parte de esas posibles pérdidas que no podemos cuantificar a esta escala de análisis.

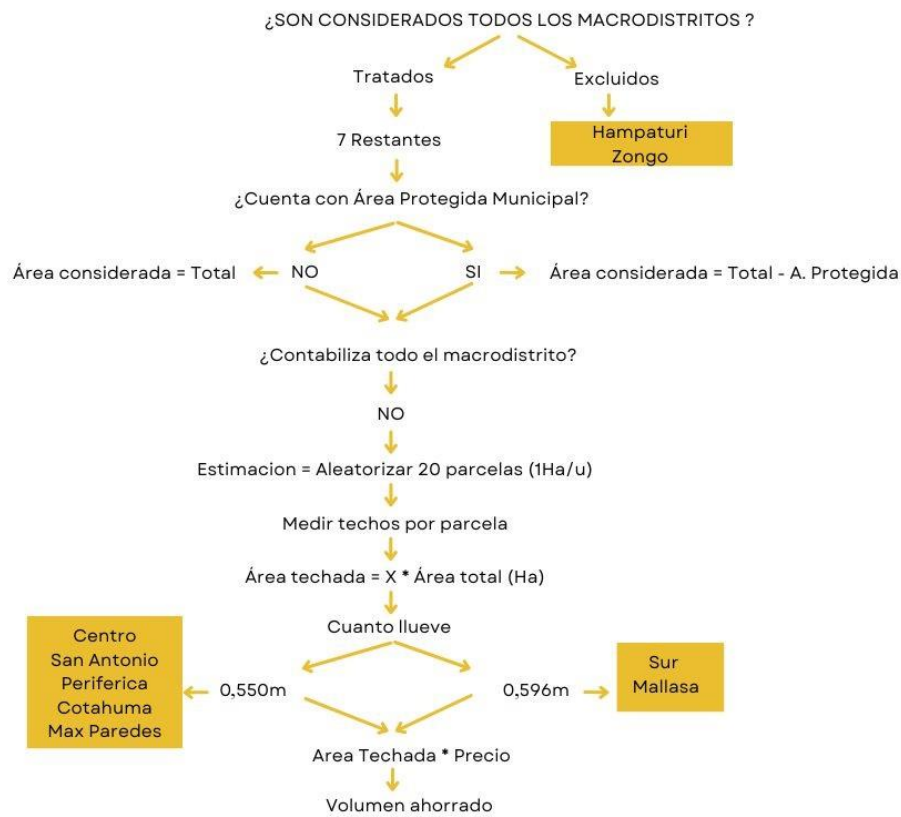


Figura 2. Esquema de obtención y tratamiento de los datos para estimar el potencial de volumen de agua capturado en techos en la ciudad de La Paz.

Formula 2: Potencial de agua acumulable por macrodistrito

$$\text{Agua acumulada} = \text{Área techos macrodistrito (m}^2\text{)} * \text{Precipitación (m)}$$

A partir del número de viviendas por macrodistrito (GAMLP, 2018) y de la tarifa local del agua, se estimó tanto el ahorro total por distrito como el ahorro promedio por vivienda. El ahorro económico de cada macrodistrito se calculó multiplicando el precio del agua (Bs/m³) por el volumen anual captado (m³), según:

Formula 3: Ahorro económico por distrito

$$\begin{aligned} \text{Dinero ahorrado por macrodistrito (Bs)} \\ = \text{Precio agua por macrodistrito (Bs m}^{-3}\text{)} \\ * \text{Volumen acumulable (m}^3\text{)} \end{aligned}$$

A su vez, el ahorro promedio por vivienda se obtuvo dividiendo este valor entre el número de viviendas de 2016 en cada distrito:

Formula 4. Ahorro económico anual por vivienda

$$\begin{aligned} \text{Ahorro por vivienda (Bs año}^{-1}\text{)} \\ = \text{Dinero ahorrado por macrodistrito (Bs)} \\ / \text{N}^\circ \text{ Viviendas (2016)} \end{aligned}$$

5. Resultados

5.1 Potencial de acumulación de agua

El promedio de superficie techada varía entre los macrodistritos de la ciudad de La Paz (Tabla 1), es más alto en Max Paredes, Periférica y Centro, y más bajo en Mallasa. Considerando las desviaciones estándar (DE), se observa una alta heterogeneidad en los macrodistritos de San Antonio, Cotahuma y Max Paredes (DE alta), lo que sugiere una distribución irregular de techos entre las parcelas. En el caso de Centro y Periférica, sus variaciones son más moderadas; posiblemente debido a que son los macrodistritos más urbanizados y con menor cantidad de áreas no techadas. En cambio, en Mallasa la gran dispersión respecto al promedio también es esperable, dada la presencia de amplias superficies sin viviendas. El cálculo del volumen de agua de lluvia potencialmente acumulable varía entre algo menos de 1 millón de m^3 (en Mallasa), hasta casi 3 millones de m^3 (en Periférica), con un total estimado > 11 millones m^3 para la ciudad de La Paz (Tabla 1). Estos valores ya incorporan una corrección del 15%, que contempla pérdidas previas al almacenamiento, como escurrimiento inicial, evaporación o filtraciones. Este volumen correspondería a la captación distribuida en techos de viviendas, por lo que su almacenamiento dependería directamente de la implementación de sistemas individuales de almacenamiento en cada hogar.

5.2 Ahorro en términos económicos

El ahorro en términos económicos, considerando un costo promedio de Bs 2,3 m^3 de acuerdo con facturas correspondientes a la gestión 2024 de la Empresa Pública Social de Agua y Saneamiento (EPSAS), alcanza un monto >24 millones de bolivianos $año^{-1}$, en base al volumen acumulable con 15% de pérdidas, con un máximo en el macrodistrito Periférica y un mínimo en el de Mallasa (Tabla 2). Utilizando el dato del número de viviendas por macrodistrito, es posible estimar un ahorro por vivienda y por macrodistrito, que varía entre Bs 78,92 y 99,64 $año^{-1}$, por vivienda (sin contar el dato de Mallasa, que nos parece sesgado por el bajo número de viviendas en ese macrodistrito). Este ahorro se distribuye de manera heterogénea entre los macrodistritos, debido a diferencias en el número de viviendas y en los hábitos de consumo.

6. Discusión

6.1 Gestión hídrica

El volumen potencial de captación pluvial anual que podría recolectarse en la ciudad de La Paz es de 13,36 (DE = 9,23) millones m^3 $año^{-1}$. Un enfoque alternativo para

dimensionar el impacto del sistema propuesto es compararlo con el consumo de agua potable promedio por hogar en la ciudad de La Paz de 103,68 m^3 $año^{-1}$ (Perales Miranda, 2023) y con la capacidad total de las represas que abastecen actualmente a La Paz, que almacenan aproximadamente 25,34 millones m^3 de agua (GAMLP, 2023a). En este marco, el volumen potencialmente captable representaría 52 % \pm 36 % de dicha capacidad. Sin embargo, es importante recalcar que este valor constituye una estimación teórica bajo condiciones ideales de captación, disponibilidad de superficie techada, y sin pérdida por escurrimiento, por lo que la variabilidad climática propia de la región puede generar fluctuaciones significativas en el volumen real captado. Al considerar la estimación del error, se incorpora un margen de incertidumbre que permite dimensionar mejor la variabilidad inherente a los datos y las posibles diferencias con respecto al valor proyectado. Como no se han considerado los coeficientes de escurrimiento, además de las posibles pérdidas (escurrimiento, evaporación, filtraciones o rebalses), se puede pensar que una cifra más cercana a lo real sea hasta un 15% inferior al cálculo ideal; esto nos deja con un potencial de captación pluvial total de 11,35 (DE = 7,85) millones m^3 $año^{-1}$. Aun así, incluso considerando una eficiencia menor en la implementación, estos resultados sugieren que el aprovechamiento del agua pluvial en techos urbanos podría constituir un aporte relevante para fortalecer la resiliencia hídrica de la ciudad frente a eventos de escasez o variabilidad climática.

No hemos hallado estudios que estimen el potencial de captación de agua de lluvia a escala de ciudades; es más común que se estime a nivel de algunas viviendas (Torres Chamat y Morales Pinzón, 2022) o para su uso en riego urbano (Roblero-Hidalgo y Flores Velázquez, 2022). Pero notablemente a nivel local, Pantoja-Rico *et al.* (2022) calcularon el potencial de captación de agua de lluvia para el campus de la Universidad Católica Boliviana San Pablo (sede La Paz), que alcanzaría aprox. 1 123 m^3 $año^{-1}$. Sin embargo, es más interesante comparar nuestras estimaciones con los sistemas de captación domiciliar de agua de lluvia en México, donde se han instalado 15 000 sistemas para captación de agua de lluvia, con un alcance de 90 000 usuarios, recolectando 600 000 m^3 $año^{-1}$ (Sánchez-Vargas y Salinas-Estévez, 2021). Debe quedar claro que el uso del agua recolectada en los techos debe asignarse según la calidad del agua recolectada, que dependerá del tipo de techo, su mantenimiento y la calidad misma del agua de lluvia. Lo más sencillo es destinar el agua recolectada al aseo o el riego; a menos que la escasez de agua potable sea muy grave. Dejamos este tema a consideración de estudios en salud pública.

Tabla 1. Área techada por macrodistrito, con el cálculo de la superficie techada, superficie del macrodistrito y el volumen de agua potencialmente acumulable. Para los macrodistritos Centro, San Antonio, Periférica, Cotahuma y Max paredes se utilizó una precipitación de 0,550 m año⁻¹; para los macrodistritos Mallasa y Sur se usó el dato de 0,596 m año⁻¹ (Miranda, *et.al.*, 2015). La última columna provee el dato ajustado con una pérdida del 15% por escurrimiento, evaporación y filtraciones.

Macrodistrito	Promedio cubierto por techos m ² ha ⁻¹	Superficie del macrodistrito ha	Superficie promedio (y DE) techada por macrodistrito m ²	Volumen de precipitación m	Volumen promedio (y DE) acumulable m ³	Volumen promedio (y DE) acumulable ajustado m ³
Centro	4 664,64 ± 1 515,6	483	2 254 951,19 (DE= 732 034,80)	0,55	1 240 223,15 (DE= 402 619,14)	1 054 189,68 (DE= 342 226,27)
San Antonio	2 505,35 ± 1 758,2	1 229	3 079 079,45 (DE= 2 160 827,80)	0,55	1 693 493,7 (DE= 1 188 455,29)	1 439 469,64 (DE= 1 010 186,99)
Mallasa	491,15 ± 744,7	3 621	1 778 454,15 (DE= 2 696 558,70)	0,59	1 049 287,95 (DE= 1 590 969,633)	891 894,76 (DE= 1 352 324,19)
Periférica	3 025,34 ± 1 163,1	1 726	5 221 736,84 (DE= 2 007 510,60)	0,55	2 871 955,26 (DE= 1 104 130,83)	2 441 161,97 (DE= 938 511,21)
Cotahuma	2 241,30 ± 2 139,9	1 776	3 980 548,8 (DE= 3 800 462,40)	0,55	2 189 301,84 (DE= 2 090 254,32)	1 860 906,56 (DE= 1 776 716,17)
Sur	1 249,40 ± 974,8	2 304	2 878 617,6 (DE= 2 245 939,20)	0,59	1 698 384,38 (DE= 1 325 104,128)	1 443 626,73 (DE= 1 126 338,51)
Max Paredes	3 600 ±	1 298	4 750,68 (DE= 2 783 950,40)	0,55	2 612 874 (DE= 531 172,72)	2 220 942,9 (DE= 1 301 496,81)
Total volumen acumulable (m ³)					13 355 520,3 (DE= 9 232 706,06)	11 352 192,24 (DE= 7 847 800,15)

Tabla 2. Cálculo del potencial de ahorro en dinero según el volumen de agua acumulable ajustado, en base al precio promedio de agua para la ciudad (dato obtenido de las facturas de EPSAS).

Macrodistrito	Precio de agua por macrodistrito Bs m ⁻³	Dinero ahorrado (promedio y DE) por macrodistrito Bs	N° de viviendas (2016)	Ahorro por vivienda (y DE) Bs año ⁻¹
Centro	2,3	2 424 636,27 (DE= 787 120,42)	24 333	99,64 (DE= 32,35)
San Antonio	2,3	3 310 780,18 (DE= 2 323 430,09)	39 231	84,39 (DE= 59,22)
Mallasa**	2,3	2 051 357,94 (DE= 3 110 345,63) **	2 054	998,71 (DE= 1 514,29) **
Periférica	2,3	5 614 672,54 (DE= 2 158 575,77)	54 630	102,78 (DE= 39,51)
Cotahuma	2,3	4 280 085,09 (DE= 4 086 447,19)	54 819	78,08 (DE= 74,54)
Sur	2,3	3 320 341,47 (DE= 3 047 739,49)	42 450	78,22 (DE= 61,03)
Max Paredes	2,3	5 108 168,67 (DE= 2 590 578,57)	56 558	90,32 (DE= 52,93)
Total para la ciudad		24 058 684,22 (DE= 14 939 594,72)		

**La suma total no incluye al macrodistrito Mallasa, por su baja cantidad de viviendas

En términos económicos, el volumen estimado representa un ahorro potencial ajustado superior a 24 millones de Bs año⁻¹ para toda la ciudad. Esta cifra, en relación con la inversión contemplada en el Plan Operativo Anual (POA) 2024 —que asciende a 1 855,37 millones de Bs, equivale aproximadamente al 1,3 % del presupuesto total del municipio de la ciudad de La Paz. El ahorro por macrodistrito es mayor en Periférica y menor en Mallasa, lo cual refleja las diferencias en superficie techada y densidad habitacional entre macrodistritos. Es importante considerar que, en situaciones de verdadera escasez, el valor real del agua se incrementa considerablemente, ya que los hogares deben recurrir al agua embotellada o hacerla llevar en cisternas a los domicilios, lo cual resultaría en un precio mucho mayor al estimado y, por tanto, en un ahorro mucho más importante. Por ejemplo, en el estudio de Pantoja-Rico *et al.* (2022) estiman el costo del agua para la Universidad Católica en 12,2 Bs m⁻³. Si bien este valor adicional puede estimarse para la ciudad, se deja abierta esta tarea a las autoridades municipales o a estudios posteriores con enfoque económico avanzado.

El ahorro por vivienda, que varía entre Bs 78,92 y 99,64 Bs año⁻¹, también ofrece una oportunidad concreta para reflexionar sobre el financiamiento e implementación de sistemas de recolección, sin entrar en un estudio de costo:beneficio a detalle (i.e Pantoja-Rico *et al.* 2022). Por ejemplo, en Periférica, el ahorro permitiría costear un tanque de 450 litros (aproximadamente Bs 450) en poco

más de tres años. Además, es importante considerar que la implementación de estos sistemas debe responder al contexto urbano específico, y que su adopción a gran escala dependerá de que existan formas de financiamiento accesibles y estrategias que faciliten su expansión, sobre todo en zonas con mayor potencial de captación. Esta inversión podría reducirse mediante subsidios o compras colectivas promovidas por el gobierno municipal, lo que haría aún más accesible la implementación masiva de estos sistemas. De acuerdo con Lobo Flores (2024) la asignación de recursos públicos debe considerar criterios no solo económicos, sino también técnicos, sociales y ambientales. Bajo esta lógica, un sistema de recolección de agua de lluvia a escala de la ciudad de La Paz cumple con múltiples dimensiones: mejora el acceso a un recurso vital, reduce la dependencia del sistema de represas, promueve la resiliencia urbana y tiene una viabilidad económica que parece muy razonable. Revollo-Fernández (2025) también destaca que, pese a los avances en la cobertura de servicios de agua en Bolivia, persisten desigualdades significativas entre áreas urbanas y rurales, así como entre distintos niveles de ingresos, ya que los hogares más pobres destinan una mayor proporción de sus ingresos al acceso al agua. En este contexto, la captación pluvial en La Paz surge como una estrategia efectiva para reducir dichas desigualdades, al ofrecer una fuente alternativa y más asequible que puede

aliviar la carga económica en sectores con menor infraestructura hídrica.

Por último, se sugiere considerar esquemas de implementación compartida (entre dos o más viviendas), especialmente en zonas con menor ahorro anual estimado, como Cotahuma. Este enfoque colaborativo, acompañado por apoyo técnico o financiero, puede facilitar el acceso al sistema y fortalecer la participación ciudadana en la gestión del agua.

6.2 Gestión de riesgos

La gestión de riesgos es un tema que integra muchos aspectos (Arteaga Galarza y Ordóñez Arízaga, 2019). de los cuales solamente vamos a discutir el riesgo que implica el agua corriendo por las calles, por causa de lluvias torrenciales. La forma de lidiar con el agua que escurre por las calles durante las lluvias es el diseño y construcción de sistemas de evacuación de aguas pluviales (Fuentes Saucedo, 2009); sin embargo, en muchos casos, los problemas se agravan debido a la obstrucción de estos sistemas de evacuación (Agencia Municipal de Noticias, 2022). Este riesgo se acentúa en zonas de topografía pronunciada como las que caracterizan a la ciudad de La Paz (CDC-UNASUR, 2015), donde las lluvias intensas pueden generar escorrentías de alta velocidad con arrastre de sedimentos y escombros, incrementando el potencial de inundaciones en las partes bajas. Este patrón ha sido ampliamente documentado en zonas de alta montaña, donde la pendiente del terreno, combinada con eventos extremos de precipitación, contribuye a un alto riesgo de inundaciones aguas abajo (Pinos y Quesada-Román, 2022). La implementación de sistemas de captación de agua de lluvia, al retener parte del agua en origen, contribuye a disminuir la presión sobre las redes de evacuaciones pluviales y a mitigar los impactos asociados a eventos extremos, particularmente en las zonas más vulnerables.

Con base a 53 años de registros, Capra Jemio (1988) estableció una relación entre la intensidad de lluvia (mm hora^{-1}) y el tiempo de duración de estas, según la frecuencia de eventos intensos. A manera de ejemplo, con un tiempo de retorno de 10 años, es posible esperar una lluvia de 50 mm hora^{-1} durante unos 15 minutos; esto significa que podrían caer casi 13 mm de lluvia en esos 15 minutos. Para dimensionar esta intensidad, podemos compararla con una de las lluvias más intensas (tal vez la más intensa) que se ha registrado en La Paz en lo que va del siglo XXI, que acumuló 39,4 mm en una hora (13,1 mm en 20 minutos, pero con duración de una hora). Una lluvia de esa intensidad significa que, en una hectárea promedio de la ciudad, caerían $0,013 \text{ m} \times 10000 \text{ m}^2 = 130 \text{ m}^3$. Si pensamos que un manzano (de 1 ha) promedio de la zona central tiene una superficie techada de 4668 m^2 , el sistema propuesto podría acumular (si los tanques de

almacenamiento están vacíos) casi la mitad de la precipitación de un evento como el indicado; es decir, unos 60 m^3 .

Con base en esta estimación, es razonable pensar que el sistema de acumulación de agua de lluvia aquí propuesto podría reducir significativamente el riesgo de que el agua de lluvia escurra por las calles, cause destrozos y muerte. Esta idea coincide con lo planteado por Stohmann Aguirre (2022), quien demostró que la urbanización creciente y los cambios en el régimen de precipitaciones han sobrecargado los sistemas de drenaje en zonas como Achumani, generando potencialmente inundaciones y deslizamientos. La urgencia de abordar este problema se hace aún más evidente a la luz de eventos recientes. En febrero de 2024, la cuenca Huayñajahuirá (en parte del macrodistrito Sur) registró una precipitación acumulada de 225,2 mm, la más alta para ese mes en los últimos 80 años, donde se documentaron precipitaciones de hasta 10 horas con intensidades de hasta $53,18 \text{ mm h}^{-1}$ (GAML P, 2024).

La reducción del riesgo de inundaciones en La Paz depende en gran medida de abordar las deficiencias actuales en la evacuación de aguas pluviales y de evaluar cómo la implementación de sistemas de captación de agua de lluvia puede disminuir los caudales que circulan por las calles de la ciudad. Por ello, es urgente integrar soluciones de manejo hídrico que aumenten la resiliencia urbana frente a estos desafíos.

7. Conclusión

El potencial de captación de agua de lluvia en La Paz se estima en $13,3 \text{ millones de m}^3 \text{ año}^{-1}$, lo que podría traducirse en ahorros económicos de más de 30 millones de bolivianos para la ciudad y entre Bs 91 y 117 Bs año^{-1} por familia, dependiendo del macrodistrito. Sin embargo, es importante aclarar que esta estimación es un cálculo teórico y potencial, ya que no considera los coeficientes de escurrimiento ni las pérdidas propias del sistema: con pérdidas de hasta 15%, el potencial de acumulación sería de $11,3 \text{ millones de m}^3 \text{ año}^{-1}$. Aun así, el sistema propuesto podría reducir significativamente el escurrimiento superficial durante lluvias torrenciales, mitigando riesgos de inundaciones y daños urbanos.

Adoptar esta idea no solo beneficiaría a las familias paceñas al hacerlas más capaces de enfrentar escasez hídrica, sino que también aliviaría la carga sobre las redes de distribución y sistemas de evacuación de la ciudad. Esta es una forma de cuidar mejor nuestros recursos y hacer que la gestión del agua sea más sostenible para todos.

Agradecimientos

Agradecemos profundamente los comentarios de dos revisores anónimos que nos ayudaron a mejorar este manuscrito. Sus observaciones y sugerencias permitieron enriquecer la claridad y solidez del trabajo presentado.

Bibliografía

- AMUN (Agencia Municipal de Noticias). (2022, diciembre 12). Alcaldía atiende 35 emergencias por lluvias, la mayoría obstrucción de sumideros e inundaciones. <https://amun.lapaz.bo/alcaldia-atiende-35-emergencias-por-lluvias-la-mayoria-obstruccion-de-sumideros-e-inundaciones/>
- ANF (Agencia de Noticias Fides). (2024, 20 de marzo). Nuevo desborde de ríos inunda calles, avenidas y destroza un puente en la zona Sur de La Paz. Noticias Fides. <https://www.noticiasfides.com/nacional/sociedad/nuevo-desborde-de-rios-inunda-calles-avenidas-y-destroza-un-puente-en-la-zona-sur-de-la-paz>
- Arteaga Galarza, D., & Ordóñez Arízaga, J. (2019). *Guía para la gestión del riesgo en sistemas de agua y saneamiento ante amenazas naturales*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Benavides-Muñoz, H. M., Lapo-Pauta, M., Martínez-Solano, F. J., Quiñones-Cuenca, M., & Quiñones-Cuenca, S. (2024). Global events and surge in residential water demand: Exploring possible hydraulic scenarios. *Water*, 16(7), 956.
- Capra Jemio, G. (1988). *Ingeniería sanitaria. Alcantarillado sanitario y pluvial*. Universidad Mayor de San Andrés.
- CDC-UNASUR. (Consejo de Defensa Sudamericana). (2015). *Atlas suramericano de mapas de riesgo de desastres causados por fenómenos naturales*. Dirección Ejecutiva de la Delegación Peruana ante el CDS-UNASUR.
- Defensoría del Pueblo. (2024). *Protocolo para la gestión integral del agua – basado en el Reglamento en materia de contaminación hídrica*. Defensoría del Pueblo del Estado Plurinacional de Bolivia. <https://www.defensoria.gob.bo/uploads/files/cartilla-protocolo-de-agua-final.pdf>
- FAO. (2013). *Captación y almacenamiento de agua de lluvia: Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe*. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. <https://www.fao.org/4/i3247s/i3247s.pdf>
- Fuentes Saucedo, F. O. (2009). Evaluación y alternativas de soluciones constructivas para sumideros de recolección de aguas pluviales en la ciudad de La Paz [Proyecto de grado, Universidad Mayor de San Andrés]. La Paz, Bolivia.
- García-Ávila, F., Guanoquiza-Suárez, M., Guzmán-Galarza, J., Cabello-Torres, R., & Valdiviezo, L. (2023). Rainwater harvesting and storage systems for domestic supply: An overview of research for water scarcity management in rural areas. *Results in Engineering*, 18, 101153. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101153>
- GAMPLP (Gobierno Autónomo Municipal de La Paz). (2018). *Cartillas macrodistributales*. Secretaría Municipal de Planificación. <https://sit.servicios.lapaz.bo/cartillas/index.html>
- GAMPLP (Gobierno Autónomo Municipal de La Paz). (2019). *Atlas catastral del municipio de La Paz*. [Atlas catastral]. Secretaría Municipal de Planificación para el Desarrollo. https://sit.servicios.lapaz.bo/sit/catastro/atlas/atlas_catastral_2019.pdf
- GAMPLP (Gobierno Autónomo Municipal de La Paz). (2023a). *Municipio de La Paz: Capacidad de embalse de las represas*. <https://sit.servicios.lapaz.bo/descargas/5CapacidadDeEmbalseDeLasRepresas.pdf>
- GAMPLP (Gobierno Autónomo Municipal de La Paz). (2023b). *Plan Territorial de Desarrollo Integral para Vivir Bien del Municipio de La Paz 2021–2025*. <https://sim.lapaz.bo/ptdi/2021-2025/documentos.html>
- GAMPLP (Gobierno Autónomo Municipal de La Paz). (2020a). *Municipio de La Paz: Crecimiento de la mancha urbana (en km²)*. <https://sit.servicios.lapaz.bo/geoestadistico/images/cuadro/4CrecimientoManchaUrbana.pdf>
- GAMPLP (Gobierno Autónomo Municipal de La Paz). (2020b). *Vivienda adecuada y los Objetivos de Desarrollo Sostenible en el municipio de La Paz*. <https://www.metropolis.org/sites/default/files/resources/vivienda-adeuada-ODS-La-Paz.pdf>
- Graham, N. (2017). Roof rainwater harvesting: Projected estimates and potential applications. *Water Resources Research*, 53(10), 8300–8314. <https://doi.org/10.1002/2017WR020906>
- Guerrero-Aguilar, M., Medina-León, A., & Nogueira-Rivera, D. (2020). Procedimiento de gestión de riesgos como apoyo a la toma de decisiones. *Ingeniería Industrial*, 41(1). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59362020000100002&lng=es&tlng=es
- Hope, R. (2024). Four billion people lack safe water. *Science*, 385(6710), 708–709.
- Iwakin, O., & Moazeni, F. (2024). Improving urban water demand forecast using conformal prediction-based hybrid machine learning models. *Journal of Water Process Engineering*, 58, 104721.
- Kordana, S., & Szoltysik, M. (2016). Estimation of potential rainwater harvesting for a residential catchment in Poland. *Journal of Cleaner Production*, 139, 1261–1271. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.095>
- Lobo Flores, W. (2024). Evaluación multicriterio para la priorización de asignación de recursos económicos en proyectos públicos. Caso “Municipio de Achocalla”, gestión 2023. *Fides et Ratio - Revista de Difusión Cultural y Científica de la Universidad La Salle en Bolivia*, 27(27), 227–248. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071081X2024000100011

- Martínez Valdés, Y., & Villalejo García, V. M. (2018). La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1), 58–72. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000100005&lng=es&tlng=es
- Miranda, G., Campero, S., & Chuma, O. (2015). *Caracterización del clima del valle de la ciudad de La Paz* (2.ª ed.). Museo Nacional de Historia Natural.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2013). *Captación y almacenamiento de agua de lluvia: Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe*. FAO.
- Ortiz, W., & Velendia, W. (2017). *Propuesta para la captación y uso de agua de lluvia en las instalaciones de la Universidad Católica de Colombia a partir de un modelo físico de recolección de agua* [Proyecto de grado en ingeniería]. Universidad Católica de Colombia.
- Pacheco, M. (2010). La gestión del agua lluvia y la reducción de riesgos urbanos. En *La gestión del riesgo urbano en América Latina*.
- Pantoja Rico, R. A., Alvizuri Tintaya, P. A., Soria Céspedes, F. A., & Lo-Iacono-Ferreira, V. G. (2022). Diseño conceptual de un sistema de captación de agua de lluvia en la Universidad Católica Boliviana San Pablo. En *26th International Congress on Project Management and Engineering*, Terrassa, 5–8 julio 2022.
- Perales Miranda, V. H. (2018). La crisis del agua en La Paz: Cambios y racionamiento del agua. *Temas Sociales*, (43), 97–124. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0040-29152018000200005
- Perales Miranda, V. H. (2023). Claves para una gestión de la crisis hídrica en La Paz. *Temas Sociales*, (53), 11–52. <https://doi.org/10.53287/towdd3794kj67g>
- Pinos, J., & Quesada-Román, A. (2022). Flood risk-related research trends in Latin America and the Caribbean. *Water*, 14(1), 10. <https://doi.org/10.3390/w14010010>
- Revollo-Fernández, D., Benavides, J. P., Wanderley, F., & Rodríguez-Tapia, L. (2025). Progress in access to water in homes in Bolivia: Special attention to inequality issues. *Water Policy*, 27(4), 465–476. <https://doi.org/10.2166/wp.2025.190>
- Roblero-Hidalgo, R., & Flores-Velázquez, J. (2022). Captación de agua de lluvia como alternativa para uso en agricultura urbana. *Vivienda y comunidades sustentables* (11), 111–124.
- Sánchez-Vargas, C., & Salinas-Estévez, J. L. (2021). Aquappolis: aplicación móvil para la captación de agua de lluvia en la CDMX. *Tecnología y ciencias del agua*, 12(5), 423–454.
- Secretaría Municipal de Planificación. (2023). *Informe Plan Operativo Anual gestión 2024 (SMP - DESP N° 13/2023)*. Gobierno Autónomo Municipal de La Paz.
- Stohmann Aguirre, R. E. (2022). Efectos de la urbanización y el cambio climático en el rendimiento del drenaje urbano: Estudio de caso de SUDS en una zona de riesgo de la ciudad de La Paz, Bolivia. *Revista Acta Nova*, 10(4), 461–488. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892022000200461
- Torres-Chamat, C. A., & Pinzón, T. M. (2022). Sistemas de captación y almacenamiento de agua alternativos desde la perspectiva del metabolismo social, Quibdó, Colombia. *Jangwa Pana: Revista de Ciencias Sociales y Humanas*, 21(3), 241–253.
- Zapperi, P. A., & Montico, A. (2022). Manejo del escurrimiento de aguas pluviales desde la perspectiva de los servicios ecosistémicos. Análisis de su abordaje en ciudades capitales de la Argentina. *Revista Geográfica de América Central* (68), 301–328.