

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

Urbanization and Climate Change Effects on Urban Drainage Performance. A Case Study of SUDS in a Risk Area in the City of La Paz, Bolivia.

Roberto Enrique Stohmann Aguirre

Estrategia Climática – Consultora en Cambio Climático y Desarrollo Urbano Sostenible, La Paz, Bolivia. Avenida Hugo Ernst 7661, Bajo Següencoma, La Paz – Bolivia.

robertostohmann@gmail.com

Resumen: La ciudad de La Paz en Bolivia ha sido testigo de muchos eventos de desastre atribuidos a un exceso de precipitaciones, provocando inundaciones y deslizamientos de tierra en los asentamientos urbanos. Este estudio presenta una evaluación cuantitativa de los efectos de la urbanización y las precipitaciones afectadas por el cambio climático sobre un sistema de drenaje en el distrito de Achumani. El área de estudio se seleccionó con base en la transformación de la cobertura del suelo, la ocurrencia de desastres y las zonas de riesgo. Estos factores sirvieron como datos de entrada para el modelo SWMM. Se consideraron dos escenarios en el modelo digital y la simulación. El primero incluyó la expansión urbana, con base en los cambios de uso del suelo de 2003, 2013 y 2020. El segundo comprendió la posible reducción/incremento de las precipitaciones debido al cambio climático y las características del uso del suelo del año 2020. Los resultados indicaron que el incremento de superficies impermeables se correlaciona con caudales máximos e inundaciones, y que la incidencia fue mayor en el estado inicial del desarrollo urbano (entre 2003 y 2013). Además, incluso con menores intensidades de lluvia en el futuro debido al cambio climático, el sistema de drenaje aún puede sobrecargarse. Mediante la inclusión de sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS) en el modelo, se pudo mejorar el rendimiento del sistema al reducir el flujo e inundaciones de manera efectiva.

Palabras clave: Cambio climático, drenaje urbano, SUDS, SWMM, urbanización.

Abstract: The city of La Paz in Bolivia has witnessed many disaster events attributed to excessive rainfall, causing flooding and landslides in urban settlements. This study presents a quantitative evaluation of the effects of urbanization and rainfall affected by climate change on a drainage system in the Achumani district. The study area was selected based on the transformation of land

cover, the occurrence of disasters and risk areas. These factors served as input data for the SWMM model. Two scenarios were considered in the digital model and the simulation. The first included urban expansion, based on land use changes in 2003, 2013 and 2020. The second included the possible reduction/increase in rainfall due to climate change and land use characteristics for the year 2020. The results indicated that the increase in impervious surfaces is correlated with maximum flows and floods, and that the incidence was higher in the initial stage of urban development (between 2003 and 2013). Also, even with lower rainfall rates in the future due to climate change, the drainage system can still be overloaded. By including sustainable urban drainage systems (SUDS) in the model, system performance could be improved by effectively reducing flow and flooding.

Keywords: Climate change, urban drainage, SUDS, SWMM, urbanization.

1 Introducción

Las ciudades de América Latina y el Caribe (ALC) se encuentran entre las más vulnerables a los desastres naturales (Gu et al., 2019). Esta condición puede verse exacerbada por los posibles efectos del cambio climático (CC) si la adaptación se retrasa en la región (Universidad de Notre Dame, 2021). Además, el Sur Global requiere potenciar el trabajo colaborativo de investigación para implementar soluciones, ya que comparativamente con el Norte Global, esta ausencia priva a la región de lograr más avances (Soler & González, 2020).

Asimismo, la región de ALC necesita proporcionar servicios públicos para satisfacer la creciente demanda de bienestar como una de las regiones más urbanizadas del mundo. Alrededor del 80% de su población vive en ciudades, con un gran crecimiento desde la década de 1950 (Muggah, 2018). Esta situación impone desafíos considerables que se suman a los existentes por el CC. Sin embargo, la falta de presupuesto (Cenci, 2020) y la deficiente planificación caracterizan a la región (Muggah, 2018).

Bajo estas circunstancias adversas, la ciudad de La Paz en Bolivia ha estado trabajando para alcanzar la resiliencia. La ciudad ha enfrentado desastres naturales en las últimas décadas, algunos de ellos posiblemente relacionados con el CC. Estos eventos extremos están conexos con la deficiencia o el exceso de precipitaciones. A fines de 2016, una sequía provocó el suministro irregular de agua a más de 340 mil personas (Ayala, 2016), a pesar de que se preveía su probabilidad de ocurrencia años antes (Hoffmann, 2016). En cuanto a las inundaciones, los eventos más dañinos ocurrieron en febrero de 2002, con más de 70 personas fallecidas y millones de dólares destinados a la recuperación de infraestructura (Hardy, 2009). En febrero de 2011, fuertes lluvias y deslaves derivaron en un deslizamiento de tierra que arrastró cientos de lotes y desplazó a más de mil familias de sus hogares (Página Siete, 2020).

Estos lamentables hechos despertaron la atención de la comunidad y de los administradores públicos para abordar el control de inundaciones y la prevención de riesgos. El Gobierno Autónomo Municipal de La Paz (GAMLP) trabaja a través de la Secretaría Municipal de Gestión Integral de Riesgos (SMGIR) para atender estos problemas y aumentar el presupuesto público para prevenir riesgos (Hardy, 2009). A pesar de estos cambios, el Municipio aún requería fuentes externas de financiamiento para alcanzar la resiliencia urbana. En 2020, el Banco Mundial otorgó un crédito por aproximadamente 59,02 millones de euros (Banco Mundial, 2020 & Money, 2020). No obstante, esta inversión se centrará en infraestructuras de gran escala y soluciones convencionales.

En este sentido, los sistemas de drenaje suelen pasarse por alto y observarse desde una perspectiva amplia. La planificación municipal a largo plazo incluye la canalización y embovedado de diferentes ríos, obras de control de caudales máximos, prevención y control de deslizamientos y estabilización de suelos (GAMLP, 2016). Aun así, los medios de comunicación informan eventos de inundaciones o movimientos de suelo durante la temporada de lluvias todos los años (Radio Fides, 2015; Página Siete, 2020; Brújula Digital, 2020), siendo posible que cambios en la cobertura del suelo provoquen estos incidentes (Arjenaki et al., 2021). En ese entendido, este estudio tuvo como objetivo evaluar la incidencia de la urbanización y los posibles cambios en las precipitaciones, debido al CC, sobre el funcionamiento de la red de drenaje. Además, el trabajo determinó si la inclusión de sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS) puede mejorar su desempeño.

2 Planteamiento del problema

2.1 Crecimiento urbano

Alrededor del 55% de las personas del planeta vivían en áreas urbanas para 2018, y se estima que alcanzará dos tercios de la población mundial para 2050. La urbanización se ha atribuido a diversos factores socioeconómicos donde se estima que entre el 70 % y el 80 % del producto interno bruto (PIB) de muchos países lo producen las ciudades (Banco Mundial, 2020). Sin embargo, aunque se espera que la población urbana y el crecimiento económico aumenten en los próximos años, es probable que aumente la inversión necesaria para hacer frente a los desastres naturales debido a su frecuente ocurrencia (Gu, 2019).

La región de ALC es la segunda región más urbanizada del mundo, con el 79 % de su población viviendo en ciudades hasta mediados de 2020 (Szmigiera, 2021). Sin embargo, uno de los problemas de su grado de urbanización actual es su gran brecha

de infraestructura con tasas bajas de cobertura de vivienda, saneamiento o recolección de aguas residuales (Muggah, 2018).

La ciudad de La Paz en Bolivia tiene características combinadas de expansión urbana, pobreza y vulnerabilidad que vale la pena analizar, ya que por su ubicación y conectividad (Barrientos, 2012), la migración hacia la ciudad se incrementó. Asimismo, existe una alta demanda de superficie restringida por la oferta del mercado, la topografía y la inestabilidad del suelo (GAMLP, 2019).

2.2 Latinoamérica bajo el agua

ALC es una de las regiones más vulnerables a los fenómenos El Niño/La Niña, que traen consigo sequías y eventos de lluvias extremas debido al cambio de temperatura del agua en el Océano Pacífico (OCHA, 2019). Si bien las sequías fueron los eventos que afectaron a más personas (alrededor de cincuenta y tres millones), las inundaciones son el tipo de desastre más común, afectando aproximadamente a 41 millones de personas en la región al 2019 (OCHA, 2019). Además, entre 1926 y 2020 causaron la muerte 48.866 personas en Sudamérica, ocasionando daños por más de treinta y siete mil millones de dólares (EM-DAT, 2021).

2.3 Perspectivas a futuro de las precipitaciones y adaptación al CC

Las proyecciones climáticas indican una influencia más notoria del calentamiento global en la temperatura de la superficie terrestre, el aumento del nivel del mar y las precipitaciones debido a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (IPCC, 2014). Dore (2005) notó un aumento general en la precipitación regional y continental, donde las áreas húmedas habituales se vuelven más húmedas y las más secas experimentan condiciones más duras. Las secuelas de la disponibilidad de agua, en deficiencia o en exceso, alcanzan a diversos componentes del desarrollo de la sociedad incluyendo que la vulnerabilidad juega un papel esencial en este sentido. Por lo tanto, la adaptación y la resiliencia se vuelven sustanciales para enfrentar los desafíos globales del CC.

Las economías desarrolladas ocupan un lugar alto en el Índice de Adaptación Global (ND-GAIN) desarrollado por la Universidad de Notre Dame (2021). Los datos de 2019 clasifican a países de ALC con una baja clasificación, con Bolivia como el segundo más vulnerable de América del Sur (133 en el ND-GAIN de 182 en total) y el quinto menos preparado para mitigar los impactos del CC (Francois, 2016 y Universidad de Notre Dame, 2021). Si bien Bolivia es uno de los contribuyentes más bajos de emisiones de GEI, con una participación global de 0,06% a 2019 (Ritchie & Roser, 2017), es vulnerable al CC debido a la pobreza extrema, la deforestación, los

cambios en los ecosistemas, la inestabilidad del clima (François, 2016) y el retroceso de los glaciares (Rangecroft et al., 2013).

2.4 La situación en la ciudad de La Paz, Bolivia

La Paz es un caso interesante de desarrollo urbano y vulnerabilidad por su ubicación y población. Con más de un millón de habitantes, se asienta en los taludes de las montañas que conforman la cuenca del río La Paz, en altitudes que varían entre los 3.000 y 4.000 msnm. Se divide en nueve macro distritos, siete urbanos y dos rurales. El área urbana ocupa aproximadamente el 5% de todo el territorio y alberga a casi el 93% de la población (GAMLP, 2015). Esta característica impone presión sobre la provisión de vivienda y servicios públicos en un contexto de creciente migración desde municipios cercanos y constante tránsito desde su vecina ciudad de El Alto (Arbona & Kohl, 2004).

Además, la topografía escarpada y las características geológicas crean diferentes rangos de vulnerabilidad (GAMLP, 2011), que el Municipio pretende controlar a través de la gestión de riesgos y la planificación urbana (GAMLP, 2019). La Ley de Uso del Suelo Urbano (LUSU) es la última norma actualizada con este objetivo (GAMLP, 2014). Sin embargo, no son infrecuentes la ocupación irregular y el comercio ilegal de terrenos, lo que dificulta la prestación regular de servicios e infraestructura o la retrasa por conflictos legales (Vargas, 2014).

Asimismo, debido a los diferentes tipos de vulnerabilidades y riesgos (GAMLP, 2011; CAF, 2019) asociados al drenaje urbano (Hardy, 2009), se está desarrollando un plan maestro (BID, 2016). Sus acciones tienen como objetivo reducir el riesgo de eventos similares a la inundación de 2002 o el mega deslizamiento de 2011. No obstante, la mayor parte de esta planificación y actuaciones se centran en soluciones convencionales y de gran envergadura, como canalizaciones, embovedados, reductores de energía y muros de contención.

2.5 SUDS y modelación: ¿una opción de solución?

Una alternativa a menor escala para la gestión de aguas pluviales son los sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS), que tienen como objetivo integrar los procesos naturales del agua en los sistemas convencionales. Algunos ejemplos de SUDS incluyen pavimentos permeables, techos verdes, estanques de retención y jardines de lluvia. Sin embargo, estas soluciones pueden presentar desafíos, ya sea por falta de información o institucionalidad (Reed, 2004) y se produzca una transformación del uso del suelo sin control ni planificación.

No obstante, los SUDS han demostrado ser un modelo eficiente para reducir inundaciones y sobrecargas de los sistemas de drenaje. La evaluación se puede realizar

a través de diferentes programas informáticos, siendo uno de éstos el Storm Water Management Model (SWMM) desarrollado por la EPA de Estados Unidos. Varios estudios en diferentes entornos y condiciones demostraron el impacto de la urbanización en la escorrentía (Borris et al. 2013; Zhou et al., 2016) y su potencial reducción utilizando SUDS (Arjenaki et al., 2021).

3 OBJETIVOS

Frente a lo expuesto, este estudio tuvo como objetivo evaluar los impactos del cambio climático y la urbanización en el desempeño de un sistema de drenaje utilizando el software de simulación SWMM e incluir alternativas de mejora para un área de interés en la ciudad de La Paz, Bolivia.

Los objetivos específicos fueron:

- Analizar datos geoespaciales identificando y cuantificando el cambio de uso del suelo y la expansión del área urbana de La Paz en las últimas dos décadas utilizando herramientas SIG.
- Elaborar una base de datos de eventos de desastres relacionados con precipitaciones e identificar posibles cambios en las lluvias en La Paz a través de revisión bibliográfica.
- Recopilar y analizar datos meteorológicos sobre precipitación pluvial y definir escenarios considerando criterios de cambio climático.
- Seleccionar un área de estudio considerando el crecimiento de la urbanización, los cambios proyectados en las precipitaciones y la ocurrencia de desastres.
- Recolectar datos de una red de drenaje y estudiar su desempeño para escenarios actuales y proyectados utilizando el software SWMM en el área de estudio.
- Evaluar los resultados y las posibles soluciones sostenibles de adaptación del drenaje (SUDS) para mejorar el rendimiento en el área de estudio.

4 MARCO TEÓRICO

4.1 Teledetección y clasificación supervisada

Por medio de la teledetección es posible obtener información de la superficie terrestre a través de imágenes satelitales. Se trata de captar estos datos de manera remota y a distancia. Por lo general se realiza por medio de la captación de ondas de longitudes cortas o largas empleando dispositivos que reciben información en microondas y luz. Este tipo de tecnologías se utilizan en distintos campos, como en la ingeniería pudiendo obtener la topografía y orografía de la Tierra. También son utilizados en agricultura, ciencias ambientales, gestión de desastres, entre otros.

Complementario a la teledetección se encuentran los sistemas de información geográfica (SIG), que permiten integrar los datos recolectados en la teledetección para su posterior análisis. Con los SIG es posible crear una diversidad de mapas, siendo una de las metodologías la clasificación supervisada. Ésta es una forma de asignar información geográfica a un conjunto de píxeles de similares características para clasificar en una categoría, como por ejemplo un área de bosques. Con esta información recogida mediante muestras de píxeles, los SIG pueden replicar la información para generar mapas de amplias extensiones de terreno para acelerar el procesamiento.

4.2 Simulación de alcantarillado pluvial

Existen varios paquetes informáticos para el cálculo de sistemas de alcantarillado, sin embargo, muchos de los comerciales se encuentran basados en el Storm Water Management Model (SWMM) desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, en inglés). El SWMM es un programa de código abierto que permite predecir la calidad y cantidad de la escorrentía de los sistemas de drenaje. Dentro de algunas de sus capacidades se encuentran el modelado hidráulico y la contabilización de procesos hidrológicos.

Además, SWMM cuenta con una amplia gama de aplicaciones como ser dimensionar y diseñar componentes de un sistema de drenaje, evaluar el funcionamiento de redes existentes, diseñar estrategias de control para minimizar desbordamientos, y evaluar la calidad del agua de escorrentía, entre otros. Asimismo, permite incluir elementos de infraestructura verde, también conocidos como SUDS.

4.3 Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) son técnicas de gestión de aguas pluviales y planificación urbana que tienen como objetivo imitar los procesos hidrológicos del desarrollo urbano y gestionar la escorrentía en el paisaje de las

ciudades. El objetivo de estos sistemas es reducir la cantidad de agua procedente de los vertidos finales y mejorar la calidad del agua vertida al medio natural, consiguiendo soluciones de gestión integral del ciclo del agua relacionadas con la protección ambiental del agua potable.

Los SUDS tratan de reproducir la hidrología natural de la cuenca, por lo que las diferentes técnicas aplicadas intentan combinarse con soluciones convencionales para este fin. Asimismo, implementan acciones como prevenir contaminación, almacenar el agua, disminuir la velocidad de flujos, y lograr infiltración al suelo.

5 Metodología

Este estudio se enmarcó en el tipo de investigación deductiva, aplicando conocimiento desarrollado de teledetección, hidrología, hidráulica y paquetes de simulación computarizados para comprender el desempeño de infraestructura de drenaje. Además, combinó métodos cualitativos y cuantitativos para determinar los datos de entrada para su procesamiento posterior bajo el esquema de tipo simulación. La figura 1 muestra el marco de procesos de esta investigación.

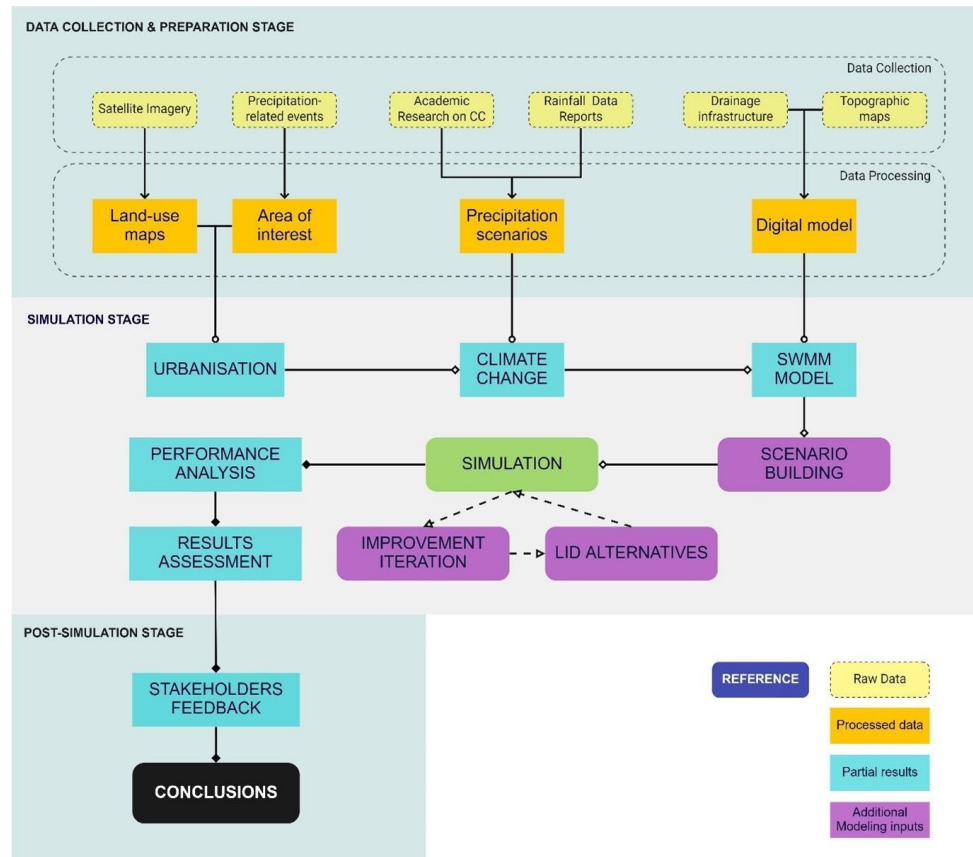


Figura 1: Diagrama de flujo de procesos para el desarrollo del estudio (Fuente: Stohmann, 2021).

5.1 Crecimiento urbano

Se crearon dos conjuntos diferentes de mapas de uso de suelo basados en imágenes satelitales. El primero utilizó datos Landsat 7 de mayo de 2000 y julio de 2020 cubriendo toda el área urbana de La Paz; mientras que el segundo conjunto se creó para el área de interés (AI) a partir de imágenes de mayor resolución. Estos últimos datos fueron recolectados del GAMLP, incluyendo imágenes RGB de QuickBird (2003) y GeoEye (2013) con una resolución de 1,2 por 1,2 m por píxel. Adicionalmente, se creó una imagen de Bing Maps de 2020 a partir de fotografías aéreas en mosaico, previamente acopladas, georeferenciadas y remuestreadas para igualar la resolución de las dos fuentes anteriores. Finalmente, los mapas de ambos conjuntos se elaboraron utilizando una técnica de clasificación supervisada (Price, 2010) en ArcMap v10.7.1, identificando diferentes tipos de cobertura del suelo.

5.2 Desastres y escenarios de cambio climático

Se construyó una base de datos recopilando y revisando portales de medios de comunicación en línea, informes institucionales y otras fuentes públicas. Asimismo, se recopilaron y revisaron artículos e informes académicos sobre posibles cambios en los patrones de lluvia en el futuro.

Además, se recolectaron datos de lluvia de diez estaciones meteorológicas dentro de los límites urbanos de La Paz. Estos datos se obtuvieron del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de Bolivia, que proporcionó registros de precipitación acumulada mensual y precipitación diaria máxima mensual. Los valores se analizaron por temporada para identificar tendencias probables, corroboradas por pruebas no paramétricas de Mann-Kendall (al 90% de nivel de confianza), ampliamente utilizadas para evaluar tendencias en series temporales (Thibeault et al., 2010).

5.3 Área de interés (AI)

El AI se seleccionó en base a tres consideraciones: mapas de evolución de la cobertura del uso del suelo (1,2 por 1,2 metros por píxel), ocurrencia de desastres (base de datos de desastres) y vulnerabilidad (mapa de riesgos de La Paz). Una vez definido el AI, se delimitaron subcuencas urbanas en base a cartografía topográfica, con curvas de nivel cada metro. Esta información se complementó con un modelo de elevación digital (DEM, en inglés) de Google Earth. En total, se delimitaron sesenta y una subcuencas para su inclusión en el modelo digital.

5.4 Modelado del rendimiento del drenaje

Se utilizó SWMM v5.1 para construir el sistema de drenaje del AI en forma digital. Primero, las subcuencas se incluyeron en SWMM con sus áreas correspondientes, porcentajes de impermeabilidad y permeabilidad, y coeficientes ponderados de rugosidad de Manning (escorrentía = n) determinados aplicando la ecuación (1). Los coeficientes fueron asignados de acuerdo a su representación física en sitio, la cual fue determinada en base a sus tipos de superficies mediante clasificación supervisada del AI.

Para áreas permeables e impermeables (n):

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n n_i \times A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (1)$$

Donde:

n_i = coeficiente Manning para cada polígono según el uso del suelo en una sola subcuenca

A_i = área de cada polígono según el uso del suelo en una sola subcuenca, en metros cuadrados

En segundo lugar, la información de la red de drenaje se obtuvo de la empresa de agua (EPSAS). Sus elementos comprendían tres subsistemas con tres puntos de descarga (emisores en SWMM), sesenta y tres cámaras de inspección (nodos) y sesenta tuberías (enlaces), subdivididos en Zona 1, Zona 2 y Zona 3. La elevación de puntos faltantes se complementó con el DEM.

Finalmente, a partir de curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) y un hietograma se utilizó un pluviómetro con un diseño de tormenta sintético de serie temporal. Las curvas IDF se calcularon con los datos de precipitación de la estación Achumani, siendo la más cercana al área de proyecto. El análisis se realizó utilizando la distribución de Gumbel, ampliamente aplicada para estudiar valores extremos de lluvia y otro tipo de eventos extremos (Meehl et al., 2000; Sánchez, 2013).

La simulación se realizó adoptando la fórmula de Horton, donde la infiltración decrece exponencialmente en el tiempo (EPA, 2015). Además, el *routing* se determinó bajo el método de ondas cinemáticas basado en la ecuación de continuidad donde '*los términos de aceleración y presión en la ecuación de momento son insignificantes*' (Chow, 1988). Finalmente, las pérdidas por fricción se determinaron utilizando las fórmulas de Hazen-Williams como ecuación de fuerza principal.

En el AI se modelaron dos escenarios. El primero incluía la evolución de los cambios de uso del suelo (ECUS) de 2003, 2013 y 2020, y reflejaba en sus subcuencas los coeficientes de escorrentía debido al grado de urbanización correspondiente. El segundo escenario incluyó las características de la estructura urbana del año 2020 (ECUS20), agregando tormentas sintéticas para casos de aumento de lluvias (ALL20) y disminución de éstas (DLL20).

Con base en los resultados, se aplicaron dos tipos de SUDS a la Zona 3 (Figura 5a) debido a su bajo rendimiento: techos verdes (TV) y pavimentos permeables (PP). Estas propuestas fueron presentadas y discutidas con dos funcionarios de la Municipalidad para determinar su factibilidad de aplicación.

6 RESULTADOS

6.1 Expansión urbana

El desarrollo en el área urbana de La Paz entre 2000 y 2020 se ha consolidado sobre dos tipos principales de cobertura del uso del suelo. Las áreas edificadas crecieron un 36,72%, mientras que el suelo desnudo disminuyó un 18,73% en ese período. Estas dos categorías tuvieron los cambios más significativos. Por otro lado, las cuatro categorías restantes identificadas (agricultura, bosques, áreas verdes y

cursos de agua) tuvieron cambios menores. A 2020, el suelo desnudo ocupaba el 48,93% del territorio urbano total y las áreas edificadas el 41,55%, mientras que las áreas verdes cubrían el 4,84%, los bosques el 2,48%, los cursos de agua el 1,37% y agricultura 0,84%. Por lo tanto, la expansión urbana fue la transformación más notable en las últimas dos décadas, reemplazando la mayor parte del suelo desnudo por áreas edificadas.

Además, la población aumentó más rápidamente que el crecimiento de la urbanización (3,66% y 1,84% anual, respectivamente). Es posible que, complementando la expansión horizontal, la ciudad también experimentó un crecimiento vertical para satisfacer la demanda. Este desarrollo impone enormes tareas para la planificación urbana y su relación con la gestión de riesgos, principalmente en áreas de alto riesgo propensas a inundaciones y deslizamientos.

6.2 Incidencia de los desastres y el cambio climático en la precipitación

Dieciséis incidentes significativos fueron catalogados y recopilados durante el período de 20 años, la mayoría de ellos ocurridos en el macro distrito Sur. Sin embargo, algunos de sus impactos alcanzaron a más de un macro distrito. Además, el tipo de evento más recurrente fue la lluvia con inundaciones. Los picos de lluvia de 2002 y 2011 (ver Figura 2a) coincidieron con los desastres de esos años (Hardy, 2009; GAMLP, 2012). No obstante, se identificaron dos factores principales en este tipo de desastres en La Paz: causas naturales como fuertes precipitaciones, condiciones topográficas y conformación geológica (Hardy, 2009; GAMLP, 2012; Otero, 2016), y deficiencia de infraestructura de drenaje (Hardy, 2009).

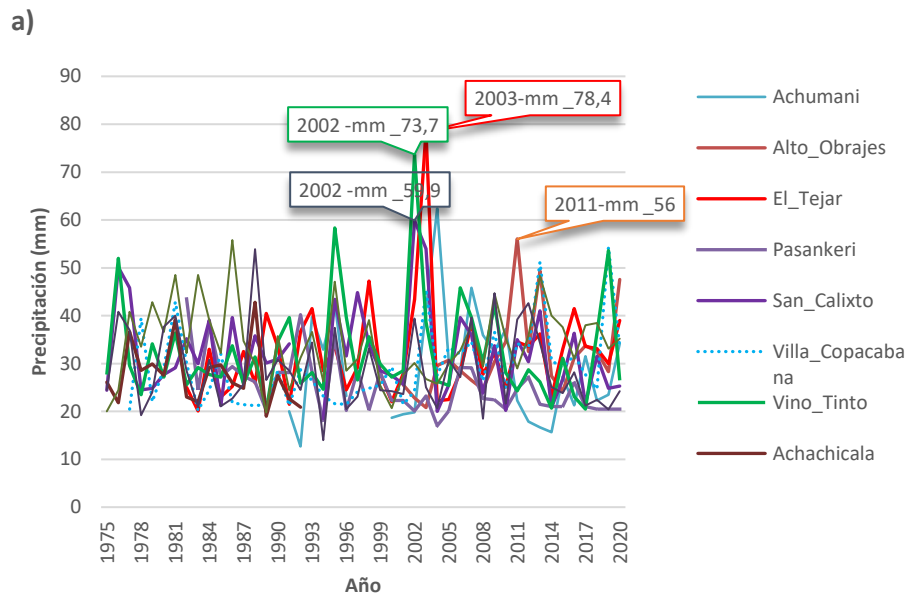
Aun así, las proyecciones y estimaciones de precipitación en el futuro de Bolivia son difíciles de definir con precisión en magnitud debido a las limitaciones de los modelos climáticos (Seiler et al., 2013). En la zona del Altiplano (consecuentemente La Paz), las variaciones pueden disminuir (Vuille, 1999; Rangecroft et al., 2013) entre 10 a 30% (Minvielle & Gerraud, 2011) durante las fases de El Niño (EN). Mientras que durante la fase de La Niña (Vuille, 1999) o por el incremento de las emisiones de GEI en los próximos años, podrían aumentar en un 20% (Seiler et al., 2013). Por lo tanto, los cambios precisos de precipitación aún son inciertos.

6.3 Análisis de precipitaciones

El análisis de los registros de precipitación permitió identificar una temporada más húmeda de diciembre a febrero en La Paz, aunque octubre, noviembre y marzo también son meses lluviosos. La precipitación promedio en estos seis meses (época húmeda) fue de 82,02 mm, mientras que el resto (época seca) fue de 16,31 mm. Los registros oscilaron entre 18 y 101 años de extensión.

Además, las tendencias al alza en la precipitación media anual y la precipitación máxima de 24 horas por año se confirmaron con pruebas de Mann-Kendall de los datos como estadísticamente significativas (valor p de 0,0502 y $2,54 \times 10^{-8}$, respectivamente). Las tendencias en ambos casos consideraron todos los datos disponibles en las diez estaciones desde 1917 hasta 2020 (consulte las Figuras 2b y 2c). Sin embargo, estos resultados no pueden confirmar si este patrón está directamente relacionado con los efectos del cambio climático.

Finalmente, para incluir los efectos del CC en la evaluación del desempeño del drenaje, se asumió un factor de seguridad de $\pm 20\%$ para la estación seleccionada. Esta suposición se hizo ponderando los resultados de Minvielle & Garreud (2012), Seiler et al. (2013), y otros autores. Con este factor, se calcularon curvas IDF adicionales para un aumento de lluvia del 20% (caso ALL20) y una disminución de lluvia del 20% (caso DLL20).



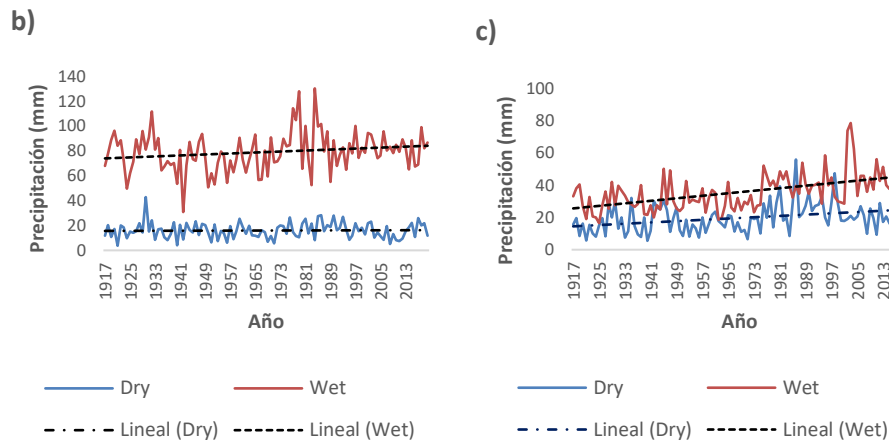
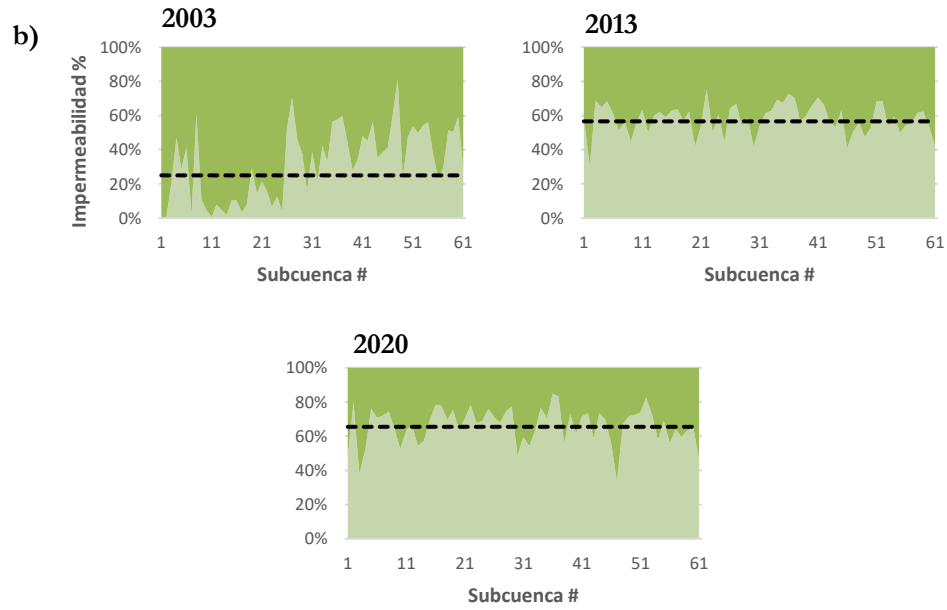
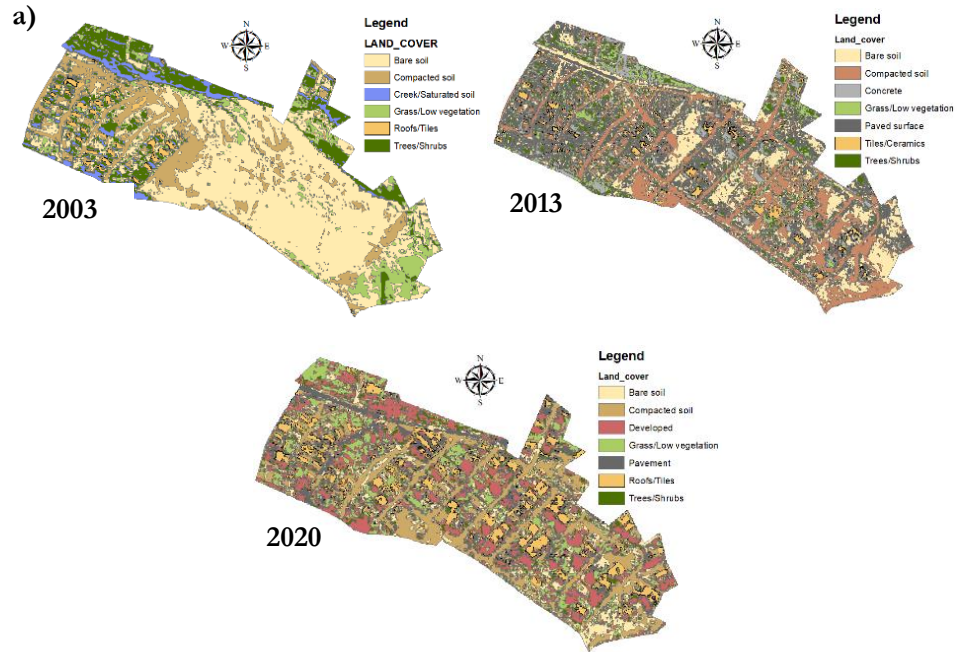


Figura 2: (a) Registros máximos de precipitación diaria de 1975 a 2020 por estación, en milímetros. *Nota: Los registros anteriores a 1975 de las estaciones San Calixto y Laykacota no se muestran en el gráfico. (b) Precipitación anual promedio (1917 a 2020) en milímetros considerando las diez estaciones, por temporada; y (c) Precipitación máxima anual (1917 a 2020) en milímetros considerando las diez estaciones, por temporada. (Fuente: Stohmann, 2021 en base a datos del SENAMHI)

6.4 Selección del Área de Interés y simulación de redes de drenaje

Doce hectáreas en una cuenca urbana fueron seleccionadas como AI. Ésta se ubica en una de las 36 zonas de mayor riesgo de la ciudad (GAMLP, 2012), en el sector Lomas del Sur del distrito de Achumani. El AI representó el rápido proceso de urbanización (Figura 3a) reflejado en el grado de impermeabilidad de sus subcuencas (Figuras 3b y 3c).



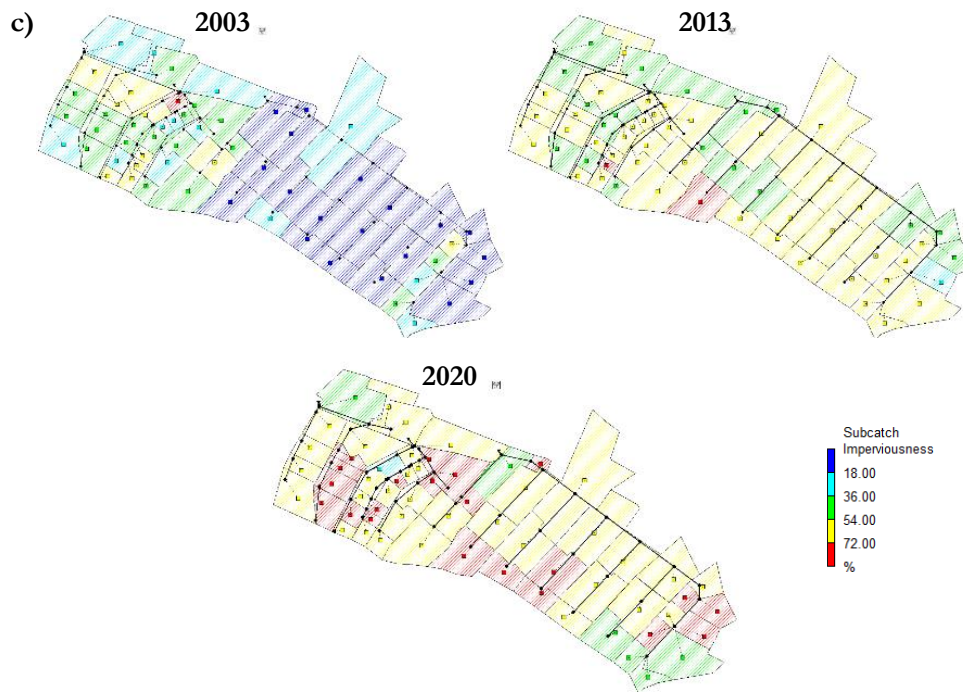


Figura 3: Mapas de cobertura de uso del suelo a partir de imágenes satelitales de resolución de 1,2 por 1,2 metros por píxel; (b) Área impermeable ponderada para cada subcuena en porcentaje. La línea punteada representa el porcentaje impermeable ponderado del año; y (c) modelo SWMM del porcentaje de impermeabilidad de cada subcuena. (Fuente: Stohmann, 2021)

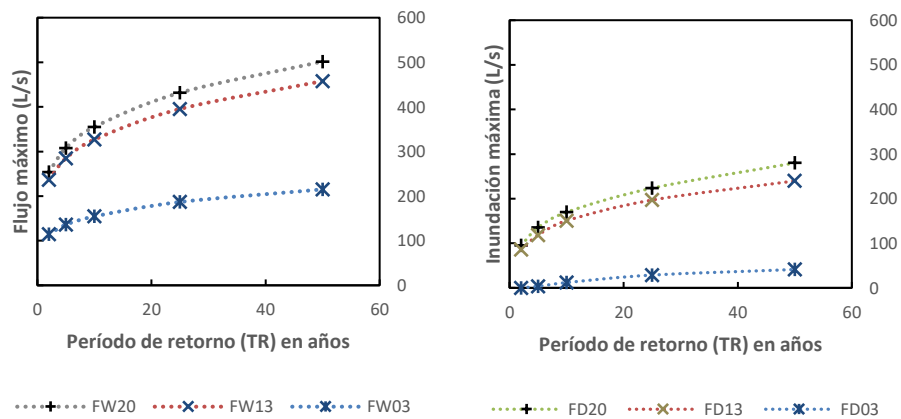
Para la simulación se derivó una tormenta de diseño a partir de las curvas IDF obtenidas desde la estación Achumani (a 1,85 kilómetros del AI) utilizando la ecuación (1) y el método de bloques alternos para periodos de retorno (TR) de 2, 5-, 10-, 25 y 50 años.

Los resultados del escenario 1 demostraron que la evolución de cambios en el uso del suelo (ECUS) en el área de estudio jugaron un papel crucial en el desempeño del sistema de drenaje. A medida que el sitio se desarrollaba y se urbanizaba más, las áreas impermeables aumentaron del 25,02 % en 2003 al 56,62 % y 65,47 % en 2013 y 2020, respectivamente. Estos cambios incrementaron el flujo pico (FP) en 110,52% para 2003-2013, con un incremento menor de 8,56% en 2013-2020. Las inundaciones (FI) entre 2003 y 2013 aumentaron sustancialmente (~1374 %), mientras que entre 2013 y 2020 rondaron el 14 %, ambos en promedio (Figura 4). Además, en la mayoría de los periodos de retorno, el sistema funcionó sobrecargado, provocando

inundaciones en las cámaras de inspección por hasta dieciocho minutos y hasta dieciséis tuberías sobrecargadas.

En el escenario 2, incluso con una reducción de la precipitación en el futuro (DLL20), el sistema se sobrecargaría. El caudal pico cayó 23,04% y las inundaciones 12%, en promedio, en comparación con el escenario 1. Sin embargo, el sistema de drenaje aún presentaba sobrecarga (5~13 cámaras de inspección inundadas, 4~11 tuberías sobrecargadas, 12~17 minutos bajo inundación dependiendo del TR). Razonablemente, el rendimiento del sistema empeoró en el caso del ALL20. FP aumentó un 23,86%, mientras que FI un 40,22%, en promedio (Figura 4). Además, el sistema tenía más elementos sobrecargados (11~26 cámaras de inspección inundadas, 8~21 tuberías sobrecargadas, 15~20 minutos bajo inundación variando con los TR).

ESCENARIO 1



ESCENARIO 2

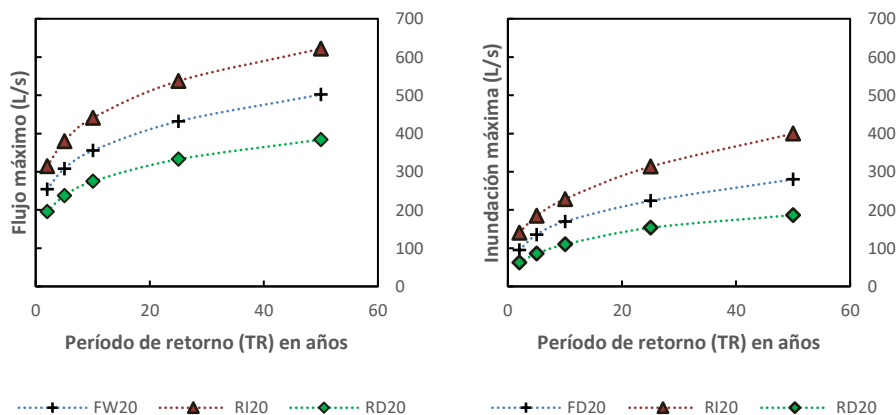


Figura 4: Gráficos de comparación para flujo pico (FP) a la izquierda y flujo por inundación máxima (FI) a la derecha por período de retorno (TR). El escenario 1 incluye los años 2003, 2013 y 2020, mientras que el escenario 2 incluye el año 2020 y los casos ALL20 y DLL20 (Fuente: Stohmann, 2021)

6.5 Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) y comentarios de las partes interesadas

Debido al bajo rendimiento y las limitaciones de espacio en la Zona 3 del AI, se seleccionaron dos tipos de SUDS para incluirlos en el sistema de drenaje. El primero incluyó nueve edificios de departamentos con techos verdes (TV), y el segundo, pavimentos permeables (PP) en las calles (Figuras 5a y 5b).

En la alternativa de TV, la reducción del flujo pico (FP) fue insignificante (-1,65 % en promedio), mientras que la efectividad aumentó para el flujo de inundaciones (FI) con un -21,86 % en promedio (Figura 5c).

En el caso de los PP, la reducción de FP y FI fue mayor que en la primera alternativa. La disminución porcentual promedio del FP fue de -9,70% y del FI fue de -36,44% (Figura 5d). No obstante, la superficie requerida por los PP es casi cuatro veces la de los TV.

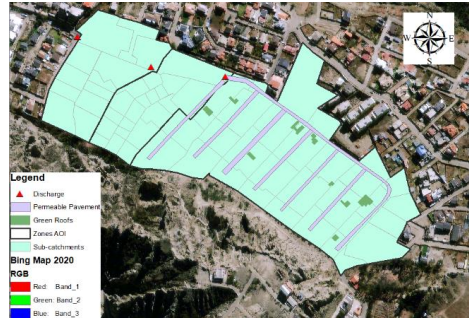
Estos resultados fueron presentados a ex funcionarios de la municipalidad, quienes consideraron que las propuestas eran factibles de aplicar, necesitando primero analizar algunas barreras de planificación, monetarias e institucionales. Asimismo, indicaron que los SUDS requieren de reglamentos o normas para reforzar

su aplicabilidad en La Paz y a nivel nacional, ya que no se encuentran en la normativa existente.

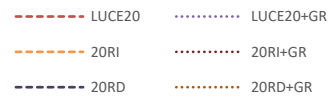
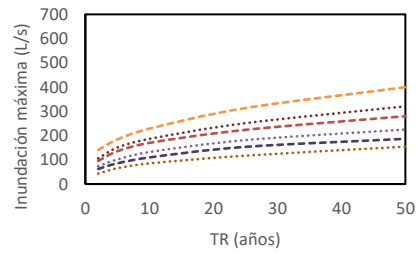
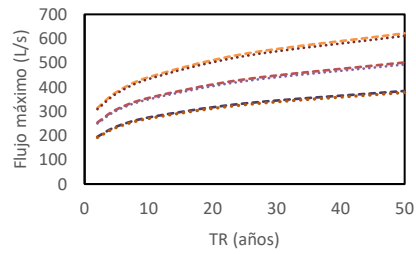
a)



b)



c) Techos verdes



d) Pavimento permeable

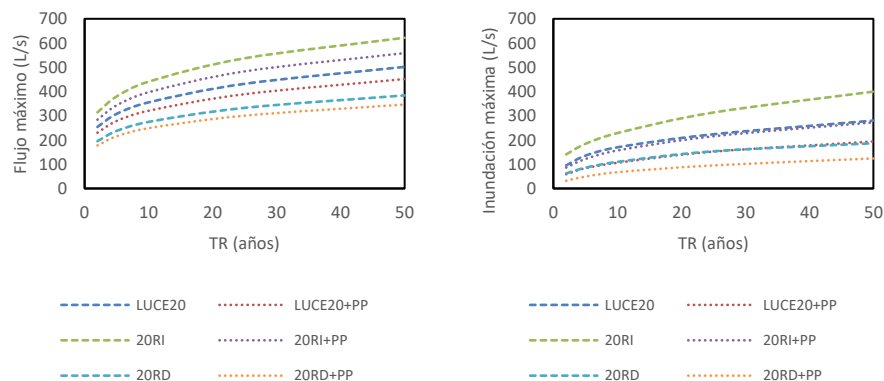


Figura 5: (a) Mapa de subdivisión del sistema de drenaje por zonas. (b) Mapa de ubicación de los techos verdes y pavimentos permeables en el AI. (c) Gráficas comparativas de techos verdes bajo diferentes escenarios y periodos de retorno, a la izquierda flujo máximo y a la derecha flujo por inundaciones, en litros por segundo. (d) Gráficas comparativas de pavimentos permeables bajo diferentes escenarios y periodos de retorno, a la izquierda flujo máximo y a la derecha flujo por inundaciones, en litros por segundo. (Fuente: Stohmann, 2021)

7 Análisis y Discusión

Los patrones de asentamiento tanto a gran escala como en pequeña se han caracterizado por un alto crecimiento de áreas edificadas en reemplazo de suelo desnudo, lo que se ha comprobado mediante la elaboración de los mapas de cobertura de uso de suelo dentro del área urbana del Municipio de La Paz, como en el Área de Interés del estudio, con una incidencia directa en el funcionamiento de la red de drenaje. Estos cambios en el tipo de asentamiento repercutieron directamente, y de manera lógica, en el grado de impermeabilización del AI. Por lo que, al contar con superficies menos porosas debido al desarrollo urbano, la simulación de un evento de lluvias mostró que los flujos de agua experimentaron menor infiltración en el suelo, conduciendo mayores volúmenes hacia la red de drenaje y de manera más rápida. Esto generó que los picos de caudal en el sistema se incrementen en el tiempo, teniendo una correlación directa con el nivel de impermeabilidad. Es decir, el análisis realizado con las condiciones de cobertura de suelo de 2003 mostró un mejor desempeño de la red de drenaje (caudal pico, caudal por inundación, cámaras de inspección inundadas, tuberías sobrecargadas, tiempo de inundación) comparado con los resultados de 2013 y 2020, donde el AI fue incrementando su desarrollo

urbano y su grado de impermeabilización. Además, bajo el escenario de cambio climático e incluso con menores precipitaciones debido a éste, la red actual presentaría fallas en sus diferentes componentes. De esta manera, los efectos de la urbanización y CC incrementan las presiones sobre el desempeño de redes de drenaje en situaciones en las que priman las superficies menos porosas y artificiales como el concreto, pavimentos, baldosas, entre otras.

Ante esta situación de carácter global, los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) han tomado un mayor protagonismo en la planificación urbana y como medida de adaptación al cambio climático. En este estudio se decidió implementar techos verdes (TV) y pavimentos permeables (PP) como alternativas para integrar este tipo de soluciones al sistema convencional existente en el AI. Los resultados de simulación demostraron que ambas opciones muestran una reducción relevante en los flujos pico y los flujos por inundación, siendo los PP más efectivos, pero requiriendo mayor superficie para su implementación. Estos hallazgos son comparables con los resultados proporcionados por otros autores, quienes también utilizaron SWMM y un enfoque similar a este estudio. Por ejemplo, Borris et al. (2013) encontró una correlación lineal entre la impermeabilidad y los volúmenes de escorrentía. Se puede lograr una reducción del 8% en el volumen de escorrentía con una disminución del 10% de la superficie impermeable. Zhou et al. (2016) también encontró que la influencia de la urbanización es proporcional a los incrementos en los caudales máximos. Aunque los porcentajes en esos dos estudios son diferentes a este, es crucial mencionar que los resultados dependen de las características de cada caso (datos de lluvia, tormenta de diseño, composición y características de la red, cobertura del uso de suelo entre otros). De esta manera la propuesta de SUDS demostró la efectividad para reducir flujos e inundaciones, sin embargo, su aplicabilidad requiere sobrepasar algunas barreras.

Los resultados fueron presentados a ex funcionarios del Municipio, quienes identificaron la necesidad de contar con una normativa de diseño que respalde su aplicabilidad técnica y a nivel de proyectos ya que actualmente, la normativa para alcantarillado pluvial no contempla este tipo de soluciones. Por otra parte, las limitaciones presupuestarias y de intervención fueron otros de los puntos a tocar. Por ejemplo, la intervención de TV se realizaría en predios privados, lo que trae consigo trabas normativas y aceptación social. En cuanto a los PP, la intervención se realizaría en espacio público, pero requeriría de mayor superficie y posiblemente un costo más alto en la fase de operación y mantenimiento debido a la necesidad de evitar taponamiento en la capa filtrante del pavimento. Sin embargo, en términos generales las propuestas de SUDS fueron vistas como un avance para incrementar la resiliencia

del Municipio ante eventos de inundación, y que además ofrecen ventajas al evitar requerir reemplazar completamente las tuberías por otras de mayor diámetro.

No obstante, existieron algunas limitaciones en esta investigación que deben ser consideradas en la interpretación de los resultados. Primero, debido a la pandemia de Covid-19 no fue posible realizar un relevamiento en terreno, lo que puede mejorar los mapas de uso de suelo resultantes y sus valores de coeficiente de escorrentía adoptados. En segundo lugar, la ocurrencia de desastres se obtuvo en línea de fuentes secundarias, ya que la Municipalidad no respondió a una solicitud de información. En tercer lugar, los instrumentos utilizados por SENAMHI no brindan intervalos de tiempo más cortos al registrar la precipitación, lo que limita el análisis detallado del modelo. En cuarto lugar, la topografía actualizada y la información de suelos pueden mejorar los resultados y las soluciones SUDS propuestas. Se adoptaron algunos valores de elevación de las curvas de nivel y las condiciones del suelo se asumieron como suficientes para implementar pavimentos permeables. Finalmente, y ante todo, se realizaron supuestos en cuanto al diseño de la tormenta, adoptando como escenario crítico una duración de 60 minutos.

Finalmente, el enfoque de simulación puede proporcionar una guía valiosa para los profesionales y los administradores públicos, ya que incluye criterios para abordar los riesgos potenciales asociados con el desempeño de los sistemas de drenaje. Dichos resultados pueden ayudar a evaluar áreas ubicadas en zonas de riesgo para activar medidas de prevención y predecir probables eventos de desastre relacionados con sistemas sobrecargados. También brindan una alternativa para implementar soluciones a través de SUDS, que pueden mejorar los flujos máximos al tiempo que aumentan la permeabilidad y reducen la escorrentía. La integración de SUDS en los nuevos asentamientos puede mejorar significativamente el funcionamiento del drenaje, pero también en los existentes donde es posible la modernización.

8 CONCLUSIONES

El desempeño del drenaje se evaluó considerando los impactos de la urbanización y el cambio climático a través de modelos de simulación utilizando SWMM en un área de estudio en La Paz, Bolivia. Los resultados indicaron que los cambios en la cobertura del uso del suelo tienen una correlación directa con el aumento de la escorrentía de aguas pluviales, que fue más significativa en el estado inicial del desarrollo urbano (entre 2003 y 2013) donde hubo una mayor notoriedad en el cambio de uso de suelo. Además, incluso con menor intensidad de lluvia debido al cambio climático, se esperan inundaciones en el sistema. Así, las áreas propensas a riesgo en La Paz pueden incrementar su vulnerabilidad por inundaciones y sobrecarga del sistema de drenaje. A capacidad llena, la filtración en la red puede

aumentar debido a la falta de mantenimiento o reemplazo de la infraestructura, siendo que su deficiencia puede ser uno de los factores desencadenantes de desastres como los ocurridos en 2002 y 2011. Los hallazgos demostraron que la inclusión de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en las redes existentes pueden beneficiar su rendimiento al reducir el flujo pico (entre 2 y 10% aprox.) y de inundación (entre 22 y 36% aprox.) de manera efectiva, lo que confirma los resultados de otros autores en estudios similares. Los representantes de la municipalidad consideraron que las alternativas de SUDS propuestas eran factibles de aplicar, necesitando primero analizar algunas barreras de planificación, monetarias e institucionales. Asimismo, indicaron que los SUDS necesitan reglamentos o normas para lograr su aplicabilidad en La Paz y a nivel nacional.

Referencias

- [1] Arbona, JM & Kohl, B., 2004. *La Paz–El Alto*. *Cities*. 21(3), págs. 255-265. (en línea). (visitado en mayo de 2021) Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2004.02.004>
- [2] Arjenaki, MO, Sanayei, HRZ, Heidarzadeh, H. & Mahabadi, NA, 2021. *Modelling and investigating the effect of the LID methods on collection network of urban runoff using the SWMM model (case study: Shahrekord City)*. *Modeling Earth Systems and Environment*. 7(1), pp.1-16. Disponible en: 10.1007/s40808-020-00870-2
- [3] Ayala, A., 2016. *No puedo dejar de pensar en el agua: Bolivia enfrenta su peor sequía en décadas*. *New York Times* (en línea). (consultado en mayo de 2021). Disponible en: <https://www.nytimes.com/es/2016/12/02/espanol/no-puedo-dejar-de-pensar-en-el-agua-bolivia-enfrenta-su-peor-sequia-en-decadas.html> (en español)
- [4] Banco Interamericano de Desarrollo – BID, 2016. *Programa de Drenaje para La Paz y El Alto. Análisis Ambiental y Social (AAS)*. BID en línea. (consultado en junio de 2020). Disponible en: <http://services.intradebid.org/datarepository/migrations/Propuesta%20de%20prstamo%20para%20el%20Programa%20de%20Drenaje%20Pluvial%20para%20las%20Ciudades%20de%20La%20Paz%20y%20El%20Alto%20III.pdf>
- [5] Banco Mundial, 2020. *Bolivia Urban Resilience. Proyectos y Operaciones* (en línea). (consultado el 25 de junio de 2020) Disponible en: <https://projects.worldbank.org/en/projects-operations/project-detail/P165861?lang=en>

- [6] Barrientos, A., 2012. *La región metropolitana Boliviana de La Paz - El Alto*. Cuaderno Urbano.
- [7] Borris, M., Viklander, M., Gustafsson, A.-M. & Marsalek, J., 2013. *Simulating future trends in urban stormwater quality for changing climate, urban land use and environmental controls*. Water Science & Technology, pp. 2082-2089.
- [8] Brújula Digital, 2020. *Torrenciales lluvias causan inundaciones de tumbas en La Paz*. Periódico en línea. (consultado el 29 de junio de 2020) Disponible en: <https://www.brujuladigital.net/sociedad/torrenciales-lluvias-causan-graves-inundaciones-en-la-paz>
- [9] CAF, 2019. *La Paz tomará medidas para enfrentar el cambio climático*. CAF - Banco de desarrollo de América Latina (en línea). (visitado en noviembre de 2020). Disponible en: <https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2019/07/la-paz-tomara-medidas-para-enfrentar-el-cambio-climatico/>
- [10] Cenci D., 2020. *Climate Change: Paradoxes in the Implementation of Agreements and Protocols in Latin America and Brazil*. En: Lorenzo C. (eds) Latin America in Times of Global Environmental Change. The Latin American Studies Book Series. Springer, Cham. (consultado el 28 de junio de 2020) Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-030-24254-1_10
- [11] Chow, VT, 1988. *Hidrología aplicada*. (en línea). (consultado en junio de 2021). Disponible en: http://ponce.sdsu.edu/Applied_Hydrology_Chow_1988.pdf
- [12] Dore, M., 2005. *Cambio climático y cambios en los patrones de precipitación global: ¿Qué sabemos?* (en línea). (consultado en febrero de 2021). Disponible en: <https://doi:10.1016/j.envint.2005.03.004>
- [13] EM-DAT, 2021. *Base de datos internacional sobre desastres*. (en línea). (consultado el 27 de junio de 2020). Disponible en: <https://public.emdat.be/>
- [14] Environmental Protection Agency – EPA, 2015. *Modelo de Gestión de Aguas Pluviales (SWMM)*. (en línea). (consultado el 3 de julio de 2020). Disponible en: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>
- [15] François, J., 2016. *Bolivia es uno de los países que más sufre el cambio climático*. Portal de Naciones Unidas Bolivia (en línea). (consultado en febrero de 2021). Disponible en: <http://www.nu.org.bo/noticias/naciones-unidas-en-linea/bolivia-es-uno-de-los-paises-mas-sufre-por-el-cambio-climatico/#:~:text=Bolivia%20es%20uno%20de%20los%20pa%C3%ADses%20que%20m%C3%A1s%20sufre%20por%20el%20cambio%20clim%C3%>

[Artículo-\(LOS%20TIEMPOS\).](#)

[&text=Seg%C3%BAAn%20Fran%C3%A7ois%2C%20la%20temperatura%20en,a%206%20grados%20hasta%202100.](#)

- [16] Gobierno Autónomo Municipal de La Paz – GAMLP, 2011. *Mapa de Riesgos de los Distritos Urbanos del Municipio de La Paz 2011*. (en línea) 2020. (consultado el 18 de abril de 2020) Disponible en:
<http://sim.lapaz.bo/sem/Biblioteca/Publicaciones/Index>
- [17] Gobierno Autónomo Municipal de La Paz – GAMLP, 2012. *Estudio del Gobierno Nacional sobre el Megadeslizamiento*. (en línea) 2020. (Consultado el 18 de abril de 2021) Disponible en:
<https://www.scribd.com/presentation/353107368/111166928-INFORME-MEGADESLIZAMIENTO>
- [18] Gobierno Autónomo Municipal de La Paz – GAMLP, 2014. *Mapa de Uso de Suelos*. (en línea) 2020. (consultado el 18 de abril de 2021) Disponible en:
<http://sitservicios.lapaz.bo/sit/LUSU/normativa.html>
- [19] Gobierno Autónomo Municipal de La Paz – GAMLP, 2015. *Plan Integral La Paz 2040*. (en línea) 2020. (Consultado el 18 de abril de 2020) Disponible en:
<http://sim.lapaz.bo/sem/Biblioteca/Publicaciones/Index>
- [20] Gobierno Autónomo Municipal de La Paz – GAMLP, 2016. *Estratégico Institucional del Gobierno Autónomo Municipal de La Paz (PEI 2016 - 2020)*. (en línea). Disponible en:
<https://www.lapaz.bo/gobierno/documentosdegestion/>
- [21] Gobierno Autónomo Municipal de La Paz – GAMLP, 2019. *Política Municipal de Vivienda y Hábitat*. (en línea). Disponible en:
https://drive.google.com/file/d/1eTt55O76CkU21_s0NcPSKl3u7B0Yxq1Y/view
- [22] Gu, D., 2019. *Exposición y vulnerabilidad a los desastres naturales para las ciudades del mundo*. Naciones Unidas, Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, División de Población, Documento Técnico No. 4.
- [23] Hardy, S., 2009. *Granizada e inundación del 19 de febrero de 2002. Un modelo de crisis para la aglomeración de La Paz*. (en línea). (visitado en diciembre de 2020). Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/275917464_Granizada_e_inundacion_del_19_de_febrero_de_2002_Un_modelo_de_crisis_para_la_aglomeracion_de_La_Paz

- [24] Hoffmann, D., 2016. *La Paz, ciudad maravillosa sin agua*. (en línea). (visitado en julio de 2021). Disponible en: https://www.cambioclimatico-bolivia.org/pdf/cc-20161205-la_paz_ciu_.pdf
- [25] IPCC, 2014. *Cambio Climático 2014: Informe de Síntesis*. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (Equipo de Redacción Central, RK Pachauri y LA Meyer (eds.)). IPCC, Ginebra, Suiza, 151 págs. (consultado en febrero de 2021). Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf
- [26] Meehl, G. et al, 2000. *Una introducción a las tendencias en eventos meteorológicos y climáticos extremos: observaciones, impactos socioeconómicos, impactos ecológicos terrestres y proyecciones de modelos*. (en línea). (visto en febrero de 2021)
- [27] Minvielle, M. & Garreaud, RD, 2011. *Proyectando Cambios en las Precipitaciones sobre el Altiplano Sudamericano*. Diario del Clima. 24(17), págs. 4577-4583. Disponible en: 10.1175/JCLI-D-11-00051.1.
- [28] Money, 2020. *BM otorga \$us 70 millones para proyecto de resiliencia urbana en La Paz y Santa Cruz*. Revista digital Money (en línea). (consultado el 20 de junio de 2020). Disponible en: <https://www.money.com.bo/construccion/bm-otorga-us-70-millones-para-proyecto-de-resiliencia-urbana-en-la-paz-y-santa-cruz/>
- [29] Muggah, R., 2018. *Las ciudades de América Latina están listas para despegar. Pero su infraestructura les está fallando*. Foro Económico Mundial (en línea). (visto el 28 de junio de 2020) Disponible en: <https://www.weforum.org/agenda/2018/06/latin-america-cities-urbanization-infrastructure-failing-robert-muggah/>
- [30] OCHA, 2019. *Desastres Naturales en América Latina y el Caribe*. (en línea). (consultado en febrero de 2021). Disponible en: https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/20191203-ocha-desastres_naturales.pdf
- [31] Otero, M., 2016. *El tema de la Gestión del Riesgo Urbano en la Educación Superior. Estudio de Caso: “Áreas de Estudio Zonificación Riesgo y Medidas de Mitigación Deslizamiento Complejo Pampabasi – Callapa*. Edu Sup Rev Cient CEPIES (en línea). 2016, vol.1, n.1, pp. 55-67. ISSN 2518-8283.
- [32] Página Siete, 2020. *Las lluvias dejan 17 muertos y 41 municipios afectados en Bolivia*. Periódico en línea. (consultado el 30 de junio de 2020). Disponible en:

- <https://www.paginasiete.bo/sociedad/2020/2/14/las-lluvias-dejan-17-muertos-41-municipios-afectados-en-bolivia-246642.html>
- [33] Price, P. 2010. *Análisis de imágenes con ArcGIS 10*. Material de lectura. Geodesia y Teledetección. Universidad de Huelva, entregado en septiembre de 2020.
- [34] Radio Fides, 2015. *Alcaldía atiende inundaciones es nueve viviendas*. Radio en línea. (consultado el 29 de junio de 2020). Disponible en: <https://www.radiofides.com/es/2015/12/12/alcaldia-atiende-inundaciones-en-nueve-viviendas/>
- [35] Rangelcroft, S. et al., 2013. *Cambio climático y recursos hídricos en montañas áridas: un ejemplo de los Andes bolivianos*. (consultado en febrero de 2021). Disponible en: <https://doi:10.1007/s13280-013-0430-6>
- [36] Reed, B., 2004. *Drenaje urbano sostenible en países de bajos ingresos ~ un estudio de alcance*. (en línea). (consultado en junio de 2021). Disponible en: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/57a08cd540f0b652dd0015be/R81681.pdf>
- [37] Ritchie, H. & Roser, M., 2017. *Emisiones de CO₂ y gases de efecto invernadero*. Publicado en línea en OurWorldInData.org. (Recurso en línea). (consultado en febrero de 2021). Disponible en: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>
- [38] Sánchez, J., 2013. *Cálculos Estadísticos en Hidrología*. Universidad de Salamanca (en línea). (visitado en junio de 2021). Disponible en: https://hidrologia.usal.es/temas/calculos_esta.pdf.
- [39] Seiler, C., Hutjes, RWA y Kabat, P., 2013a. *Variabilidad y Tendencias del Clima en Bolivia*. Revista de Meteorología y Climatología Aplicadas. 52(1), págs. 130-146. Disponible en: 10.1175/JAMC-D-12-0105.1.
- [40] Seiler, C., Hutjes, RWA y Kabat, P., 2013b. *Rangos Probables de Cambio Climático en Bolivia*. Revista de Meteorología y Climatología Aplicadas. 52(6), págs. 1303-1317. Disponible en: 10.1175/JAMC-D-12-0224.1.
- [41] Soler R., Gonzalez JH, 2020. *Conocimiento científico sobre recursos naturales en América Latina: condicionantes y desafíos estratégicos para la región*. En: Lorenzo C. (eds) América Latina en Tiempos de Cambio Ambiental Global. La serie de libros de estudios latinoamericanos. Springer, Cham. (consultado el 28 de junio de 2020) Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-030-24254-1_4
- [42] Szmigiera, M., 2021. *Grado de urbanización (porcentaje de población urbana sobre la población total) por continente en 2020*. Statista (online). (consultado en julio de

2021). Disponible en:

<https://es.statista.com/estadisticas/270860/urbanizacion-por-continente/>

- [43] Thibeault, JM, Seth, A. & Garcia, M., 2010 *Clima cambiante en el altiplano boliviano: Proyecciones CMIP3 para temperaturas y precipitaciones extremas* . J. Geophys. Res., 115, D08103, doi:10.1029/2009JD012718.
- [44] Universidad de Notre Dame, 2021. *La Iniciativa de Adaptación Global de Notre Dame ND-GAIN*. (en línea). (consultado en julio de 2021). Disponible en: <https://gain.nd.edu/our-work/country-index/rankings/>
- [45] Vargas, N., 2014. *El asentamiento irregular como principal fuente de crecimiento urbano en Bolivia: entre ilegalidad y constitucionalidad*. América Latina, Hoy. 68(68), págs. 57-78. Disponible en: 10.14201/alh2014685778.
- [46] Vuille, M., 1999. *Circulación atmosférica sobre el Altiplano boliviano durante períodos secos y húmedos y fases extremas de la Oscilación del Sur*. Revista Internacional de Climatología. 19(14), págs. 1579-1600. Disponible en: 10.1002/(SICI)1097-0088(19991130)19:14<1579::AID-JOC441>3.0.CO;2-N.
- [47] Zhou, Q., Ren, Y., Xu, M., Han, N., Wang, H., 2016. *Adaptation to urbanization impacts on drainage in the city of Hobhot, China*. Water Science & Technology. 8 January 2016; 73 (1): 167–175. (visitado 29 de junio de 2020) Disponible en: <https://doi.org/10.2166/wst.2015.478>