

## ESTRATEGIAS SUSTENTABLES PARA LA GESTIÓN DEL AGUA PLUVIAL URBANA EN EL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE OAXACA

### SUSTAINABLE STRATEGIES FOR THE MANAGEMENT OF URBAN RAINWATER IN THE HISTORICAL CENTER OF THE CITY OF OAXACA

Gaspar Alvarado J. <sup>1</sup>, Rodríguez Sánchez L. C. <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, Facultad de Arquitectura "5 de mayo", Calle 5 de mayo  
No. 100, Centro, Oaxaca de Juárez, C.P. 68000, Oaxaca, México.

\*jassiel9407@gmail.com

#### Artículo Científico

Publicado: 17 de diciembre 2024

#### RESUMEN

El inminente crecimiento urbano y poblacional a nivel mundial está llevando al límite los recursos de las ciudades, modificando su comportamiento y obligándolas a cambiar su estructura. Los recursos en las grandes urbes son cada día más insuficientes, siendo el agua, la principal escasez, necesitando fuentes externas para satisfacer la demanda del vital líquido. México afronta un alto nivel de urbanización en cada una de las ciudades que lo conforman; el estado de Oaxaca, al igual que el resto del país, comienza a evidenciar problemáticas del crecimiento poblacional, dentro de los que destaca, el estrés de los recursos hídricos y el enorme desafío para la administración y gestión del agua. El presente es el resultado de una investigación realizada en el Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca, el cual se encuentra ubicado en uno de los estados considerado con mayores porcentajes de lluvia a nivel nacional; con condicionantes geográficas de abundantes pendientes y laderas de baja permeabilidad, volviéndolo una zona con altas probabilidades de inundación. El

objetivo principal fue la generación de estrategias sustentables para la gestión y aprovechamiento del agua pluvial urbana en el Centro Histórico de Oaxaca de Juárez, desde el enfoque de ciudades sensibles al agua, a fin de disminuir a futuro el estrés hídrico y la vulnerabilidad de zonas inundables, basándose en las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM); estrategias como la infraestructura verde y renaturalización, las cuales han demostrado propiciar un mejor balance en materia de los recursos hídricos de las ciudades.

**Palabras clave:** agua urbana, estrategias pluviales, ciudad sensible al agua, estrés hídrico.

#### ABSTRACT

The imminent urban and population growth worldwide is pushing the resources of cities to the limit, modifying their behavior and forcing them to change their structure. Resources in large cities are increasingly insufficient, with water being the main element of scarcity, needing external sources to meet the demand for

the vital liquid. Mexico faces a high level of urbanization in each of the cities that make it up; The state of Oaxaca, like the rest of the country, begins to show problems of population growth, among which stands out the stress of water resources and the enormous challenge for the administration and management of water. This document is the result of an investigation carried out in the historical Center of the City of Oaxaca, which is located in one of the states considered with the highest percentages of rainfall nationwide; with geographical conditions, abundant slopes and hillsides of low permeability, making it an area with high probabilities of flooding. The main objective was the generation of sustainable strategies for the management and use of urban rainwater in the Historic Center of Oaxaca de Juárez, from the approach of water-sensitive cities, in order to reduce future water stress and vulnerability of flood zones, based on the recommendations of the World Meteorological Organization (WMO); strategies such as green infrastructure and renaturation, which have proven to lead to a better balance in terms of water resources in cities.

**Keywords:** urban water, strategies rainwater, water sensitive city, water stress.

## INTRODUCCIÓN

Más de la mitad de la población mundial reside actualmente en ciudades. Las grandes urbes son motores del progreso social y del crecimiento económico, en

ellas se genera la mayor proporción de la producción económica mundial [1].

Las ciudades del siglo XXI se enfrentan a enormes desafíos relacionados con el cambio climático; altos índices de contaminación, agotamiento de recursos naturales, altas temperaturas, pérdida de permeabilidad en sus suelos e incremento en la densidad urbana, entre muchos otros factores

El cambio climático afecta el suministro de agua, y si las proyecciones actuales son correctas, se auguran cambios importantes en el suministro de agua en todo el mundo. En términos de agua dulce, se prevé que durante el siglo XXI se reduzca el agua renovable superficial y subterránea en la mayoría de las regiones subtropicales secas, lo que incrementará la competencia entre los usuarios. Los efectos del cambio climático se acentuarán en las zonas con rápidos procesos de urbanización, sin dejar de lado los impactos en el medio rural por la disponibilidad del agua y los cambios de temperatura, que podría derivar en el desplazamiento de las zonas de cultivo y, por consiguiente, incidir tanto en la población rural como en la seguridad alimentaria en general [2].

La desmedida urbanización, genera afectaciones a los entornos naturales, donde sus principales problemáticas son la disminución de zonas de infiltración, urbanización de laderas, deforestación, disminución de áreas verdes y urbanización en zonas de riesgo.

México cuenta con un alto nivel de crecimiento urbano en cada una de las ciudades que lo conforman. Esto se

traduce en un gran estrés de sus recursos, principalmente los hídricos y un enorme desafío para la administración y gestión del agua.

El estado de Oaxaca no se encuentra indiferente en esta problemática; de acuerdo al análisis desarrollado por Nava en 2019, la región de Valles Centrales, descrita como la más importante en términos poblacionales económicos y políticos a nivel estatal, es además, la región que consume más agua, siendo los pozos profundos la principal fuente de agua de abastecimiento para consumo humano en la zona.

La región consume anualmente 121.8 millones de m<sup>3</sup> de agua, de los cuales se estima que del subsuelo se extrae alrededor del 90% del agua para uso y consumo humano por medio de pozos profundos, un 8% a través de norias y solo el 2% de manantiales y galerías filtrantes [3].

Aunado a eso, Oaxaca es considerado como un estado costero, por lo cual sufre los efectos de los fenómenos hidrometeorológicos asociados con la entrada de huracanes y tormentas tropicales, así como todas las consecuencias que estos ocasionan, como son las precipitaciones pluviales extremas, los deslizamientos de tierra, los flujos de lodo, los derrumbes de cerros y las inundaciones, determinados también por condiciones geomórficas [4].

En la región de Valles Centrales de Oaxaca la sequía ha alterado el ciclo hidrológico, con consecuencias graves en los ciclos naturales de especies de flora y fauna, así como también en los sistemas agrícolas, donde se pierden entre 80 y 100

hectáreas de diversos cultivos anualmente. Se estima que los descensos en las precipitaciones pluviales en esta región han llegado a alcanzar hasta 25% y, según las proyecciones al año 2030, se esperan descensos de 5mm. Esta alteración hídrica contribuye a que sea una región altamente dependiente del acceso, uso y aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos. [3].

En diferentes escalas, dentro del área urbana y suburbana del municipio de Oaxaca de Juárez, los procesos naturales se han visto inducidos por la deforestación, así como por los cortes y modificaciones a los escurrimientos superficiales provocados por la construcción de avenidas, calles y carreteras, y en general por todas aquellas alteraciones al terreno resultantes de la urbanización y el crecimiento descontrolado de la mancha urbana, generando suelos rígidos de descarga rápida, que además limitan la capacidad de absorción natural.

Lo anterior ha traído como consecuencia el incremento de zonas vulnerables a hundimientos, deslaves y deslizamientos de suelos y roca [4].

La importancia de generar un análisis para la gestión del agua pluvial urbana en el Centro Histórico de Oaxaca de Juárez, responde a la situación actual en la que se encuentra inmersa la zona de estudio; se requiere de forma inmediata, políticas de prevención y mitigación, ante desastres naturales, además de un correcto manejo de las aguas pluviales que permita su retención, reutilización e infiltración superficial. Para ello, se realizó un análisis climático de los últimos treinta años de la

ciudad de Oaxaca, considerado un periodo climatológico mínimo representativo según la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Con base en los datos obtenidos, se observó una clara relación entre el aumento de las temperaturas y la disminución de la precipitación.

La explotación de aguas subterráneas, la contaminación y modificación de cuerpos superficiales, así como la falta de estrategias para la gestión del agua, son los puntos principales que busca analizar y trasladar a la formulación de estrategias sustentables aplicadas a la gestión y el aprovechamiento del agua pluvial urbana en la zona de estudio; buscar recuperar las zonas de infiltración naturales, por medio de procesos como la renaturalización, jardines de lluvia e infraestructura verde, así como la realimentación de mantos freáticos, pueden permitir mitigar los problemas encontrados en el área.

## METODOLOGÍA

Para los efectos de este análisis se determinó que las estrategias sustentables para la gestión del agua pluvial urbana son la recopilación y traducción de estrategias aplicadas en diversas zonas y países del mundo, donde se muestran resultados positivos en el manejo de aguas urbanas, observando resultados positivos después de su aplicación.

El presente trabajo de investigación, implementó un método de estadística

descriptiva, en el cual se contemplaron las siguientes fases:

1) Análisis de condicionantes climatológicas: Una vez delimitado la zona de estudio, se identificaron las características climatológicas, determinando elementos como lo son variaciones en temperatura, lluvia o humedad.

2) Fenómenos relativos al cambio climático: Identificación de variaciones en el comportamiento y aumento de las temperaturas, y comportamiento histórico de precipitación de agua pluvial registrada en los últimos 30 años.

3) Características físicas y morfológicas de la zona de análisis: Identificación de características geológicas y morfológicas, ubicación de mantos acuíferos microcuencas y cuerpos de agua, así como la localización de escurrimientos de agua, identificación de áreas verdes y comportamiento urbano en el área de estudio.

4) Análisis de los resultados obtenidos: se analizaron las amenazas y oportunidades asociadas con las aguas pluviales urbanas, identificando primordialmente las siguientes problemáticas: I) incremento de tormentas y precipitaciones por efecto del cambio climático; II) aumento poblacional; III) disminución de zonas de infiltración, IV) deficiencias en el sistema de drenaje; V) pérdida de vegetación urbana; VI) aumento del efecto isla de calor. Esta fase permitió la identificación de las zonas de alto riesgo y zonas de aprovechamiento pluvial.

5) Formulación de estrategias: La recopilación, análisis de la información y

elementos de estudio, determinaron y justificaron la integración final de propuestas, generando un catálogo de acciones y estrategias para el manejo sustentable del agua pluvial en la zona de estudio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Selección de la zona de estudio.** En Oaxaca, según Olivia Topete existen pocas a nulas investigaciones que aborden la escases de agua a finales del siglo XIX y principios del siglo XX. Justificando la utilidad del presente artículo, en el vacío histórico de investigación durante este periodo y tema específico.

Desde esta perspectiva, es importante señalar que durante este periodo se dieron importantes transformaciones urbanas y sociales, que potenciaron y aumentaron el consumo del vital líquido tanto a nivel nacional como estatal. En el caso del estado de Oaxaca, hubo un importante incremento en los usos del agua para la minería, el riego, la industria y los servicios públicos. De 1895 a 1910, en Oaxaca surgió el auge de actividad minera que se vivió en México. Además, la agricultura comercial aumentó a un ritmo anual de 6.29 % entre 1877 y 1910 [5]. Es desde estos años cuando comienza la problemática por la escases del agua que hasta el día de hoy afecta al estado. Actualmente en nuestro país, la agricultura sigue siendo el principal consumidor de agua, utilizando entre 68% y 70% de este recurso.

Oaxaca presenta un gran crecimiento poblacional y empresarial. El aumento en la demanda para las diversas industrias, así como una creciente necesidad de abasto y saneamiento de la ciudad fueron algunos factores que propiciaron que las solicitudes y las concesiones de agua se elevaran [5].

El Municipio de Oaxaca de Juárez, capital y ciudad más importante del Estado de Oaxaca, se localiza en la región de Valles Centrales, entre las coordenadas 17° 01' y 17° 10' de latitud norte y 96° 40' y 96° 47' de longitud oeste. Tiene un área de 85.48km<sup>2</sup> que equivale al 0.1% de la superficie total del estado [4]. En términos del escenario, la ciudad se encuentra en lo que se ha llamado el "Acuífero Valles Centrales", que se localiza en la porción centro del estado y está constituido por tres valles: Etna, Tlacolula y Zimatlán, que convergen en el área donde se ubica la Ciudad de Oaxaca. Comprenden una extensión de 5,940km<sup>2</sup>, de los cuales aproximadamente 1,130km<sup>2</sup> conforman la zona de extracción de agua subterránea [6].

La zona de estudio elegida, fue el Centro Histórico del Municipio de Oaxaca de Juárez; colindante con la Sierra Norte, con una morfología que varía entre una composición relativamente plana en la zona de valles, a muy abrupta en la zona de montaña. Esta morfología, y la falta de infraestructura adecuada para la retención y conducción del agua, propicia una serie de problemáticas, especialmente cuando se presentan tormentas, pudiendo provocar eventos combinados de desbordamiento de la red de drenaje, así

como calles y propiedades privadas inundadas (especialmente las que están construidas bajo el nivel promedio del suelo). Las zonas con riesgo de inundación en la zona de estudio, son en el suroeste, las calles 20 de noviembre y Valerio Trujano, con un radio de tres manzanas a la redonda, y al lado norte las calles de Carretera Internacional y Calzada Porfirio Díaz donde el radio varía entre cuatro a seis manzanas a la redonda derivado del Rio San Felipe y Rio Blanco, mismo cause que fue entubado.

Las características morfológicas de la zona, aunado al gran valor cultural, patrimonial e histórico que contiene la zona de estudio, lo vuelven una zona de alta relevancia para esta investigación.

**Comparación de variables climáticas con relación al fenómeno de precipitación.** La temperatura es el efecto del cambio climático que podemos apreciar con mayor facilidad, manteniendo una estrecha relación con la cantidad de precipitación y suministro del vital líquido.

El agua, aunque siempre ha sido esencial para la existencia de las ciudades, fue considerada por los urbanistas y planificadores del siglo XX como un elemento poco importante a nivel del ordenamiento de los espacios públicos.

En consecuencia y durante más de un siglo, el agua potable y las aguas servidas se manejaron de manera subterránea y oculta, mientras que las aguas de lluvia fueron vistas como un elemento ocasional pero conflictivo. Con el advenimiento del cambio climático las lluvias se incrementaron, y el riesgo de inundación

se convirtió en amenaza constante para muchas ciudades del mundo [7].

En la región de Valles Centrales la sequía ha alterado el ciclo hidrológico con consecuencias graves en los ciclos naturales de especies de flora y fauna, así como también en los sistemas agrícolas, donde se pierden entre 80ha y 100ha de diversos cultivos anualmente. Se estima que los descensos en las precipitaciones pluviales en esta región han llegado a alcanzar hasta 25% y, según las proyecciones al 2030, se esperan descensos de 5mm. Esta alteración hídrica contribuye a que sea una región altamente dependiente del acceso, uso y aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos. Sin embargo, esta problemática de origen climático se acentuaría aún más no por razones antropogénicas, sino por decisiones gubernamentales e institucionales [3].

Con base en la fuente de datos existentes en la Comisión Nacional del Agua, se genero un análisis en las variables de precipitación y temperatura en un periodo de tiempo de treinta años. La finalidad de este análisis, era comprobar la relación existente entre el aumento de las temperaturas y la disminución de precipitación en la zona de estudio.

Aunque, el estado de Oaxaca se sigue manteniendo por arriba del promedio nacional en cuanto a la captación pluvial obtenida anualmente (821mm), la cantidad obtenida de manera histórica presenta graves disminuciones en al menos los últimos diez años.

Después del año 2010, podemos apreciar una drástica disminución en las precipitaciones del área de estudio,

presentando mínimos alarmantes en el año 2016, así como un constante decremento en los últimos cinco años analizados.

La **Figura 1** muestra la depreciación en la cantidad de lluvia, los resultados anuales se encuentran graduados en formato de color semáforo, siendo los colores rojizos, los años con menor cantidad de precipitación, mientras que el color verde refleja los años con mayor cantidad de precipitación registrada.

En 11 años Oaxaca sigue sin recibir al menos 1500mm de precipitación anual, siendo el 2016 el año con menor precipitación pluvial en los últimos veinticuatro años.

Estos datos mantienen un comportamiento regular en periodos de al menos cinco años, sin embargo, son alarmantes debido al poco porcentaje de precipitación registrada.

Históricamente los meses con mayor precipitación en la zona de estudio son los meses de junio a septiembre.

El mes de Julio, situado en la zona media del periodo de lluvias, presenta graves disminuciones y variaciones en su comportamiento, siendo el año 2008 el año con menor captación pluvial registrada en los últimos treinta años.

En la **Figura 2** podemos apreciar bajo el mismo esquema cromático de semáforo antes expuesto, las variaciones

mensuales en la precipitación; por su parte los meses de junio, agosto y septiembre mantienen una tendencia a la baja desde hace diez años.

Estas variaciones en el comportamiento climático, mantienen una gran relación con el aumento de las temperaturas **Figura 3.**

El año 2002 fue el último año con temperaturas promedio por debajo de los veintinueve grados, siendo el año 2013 el más caluroso en la zona de estudio. Teniendo un promedio de veinte años con temperaturas que continúan en aumento y una constante disminución de precipitación, podemos esperar que este comportamiento prevalezca durante los próximos años, con una alta probabilidad de escenarios aún más negativos en el área de estudio y zonas vecinas.

### **Detección e identificación de zonas de alto riesgo y zonas de aprovechamiento.**

La ciudad de Oaxaca de Juárez, se encuentra en una ubicación geográfica en torno a un valle, delimitado por zonas montañosas.

Topográficamente, la región se eleva gradualmente de los 1500 hasta los 3100 m s.n.m. La máxima elevación se localiza al noreste y constituye la cima del Cerro Peña de San Felipe; sin embargo, se observan elevaciones menores con alturas que van de los 1800 a los 1900 m s.n.m. [4].

PRECIPITACIÓN ANUAL EN OAXACA EN LOS ÚLTIMOS 30 AÑOS		
AÑO	TOTAL, ANUAL	CLASIFICACIÓN
2021	1236.8	
2020	1125.6	
2019	1089.5	
2018	1217.1	
2017	1440.7	
2016	993	
2015	1002.3	
2014	1185.6	
2013	1237.7	
2012	1360	
2011	1388.6	
2010	1940.1	
2009	1267.5	
2008	1710.3	
2007	1155.2	
2006	1270.2	
2005	1618.3	
2004	1340.7	
2003	1466.6	
2002	1496.4	
2001	1737.6	
2000	1677.1	
1999	1961	
1998	1821	
1997	1286.7	
1996	1320.1	
1995	1922.5	
1994	1430.7	
1993	1697.3	
1992	748.5	
1991	1034.5	
1990	1364	

**Figura 1.** Precipitación anual en Oaxaca en los últimos 32 años, 1990-2021 (fuente: edición del autor con datos de CONAGUA).

MESES CON MAYOR PRECIPITACIÓN				
AÑO	MESES			
	JUN	JUL	AGO	SEP
2021	318.90	132.10	231.10	249.70
2020	148.60	169.10	303.20	238.20
2019	155.80	145.20	162.70	227.30
2018	231.70	86.20	208.40	178.60
2017	355.60	183.00	207.00	320.00
2016	187.60	164.20	212.30	203.20
2015	173.20	158.00	122.50	176.20
2014	258.90	103.30	159.90	255.40
2013	187.90	133.50	204.20	409.40
2012	349.20	140.00	315.40	219.50
2011	248.30	453.10	292.50	186.50
2010	241.10	371.30	679.30	460.50
2009	241.80	201.80	210.20	264.40
2008	415.80	393.20	243.60	353.20
2007	125.00	267.60	306.10	190.00
2006	167.80	291.80	221.90	226.90
2005	271.70	336.80	369.30	239.00
2004	262.70	219.60	233.60	195.70
2003	346.60	256.30	178.10	303.40
2002	322.90	289.60	220.80	309.00
2001	286.00	328.40	313.70	318.10
2000	306.80	178.50	378.80	244.70
1999	392.40	377.10	306.60	490.60
1998	147.00	377.00	198.40	543.50
1997	141.10	213.90	124.30	243.00
1996	256.00	318.80	310.40	171.80
1995	203.40	308.80	675.30	132.00
1994	133.00	178.20	305.50	356.80
993	253.90	227.50	481.10	397.40
1992	139.00	145.30	137.20	140.10
1991	333.50	122.00	80.30	161.90
1990	183.20	196.60	211.00	211.10

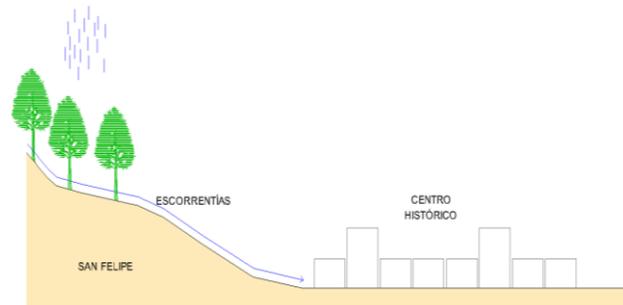
**Figura 2.** Meses con mayor precipitación en Oaxaca en los últimos 32 años, 1990-2021 (fuente: edición del autor con datos de CONAGUA).

TEMPERATURA ANUAL PROMEDIO EN OAXACA EN LOS ÚLTIMOS 30 AÑOS		
AÑO	TOTAL ANUAL	NIVEL
2021	30.30	
2020	30.80	
2019	31.10	
2018	30.40	
2017	30.80	
2016	31.20	
2015	31.20	
2014	30.70	
2013	31.60	
2012	31.00	
2011	30.90	
2010	29.80	
2009	30.70	
2008	29.80	
2007	31.50	
2006	31.50	
2005	31.10	
2004	31.30	
2003	30.30	
2002	28.70	
2001	28.10	
2000	28.60	
1999	29.10	
1998	29.60	
1997	28.20	
1996	28.40	
1995	28.20	
1994	29.50	
1993	28.30	
1992	27.90	

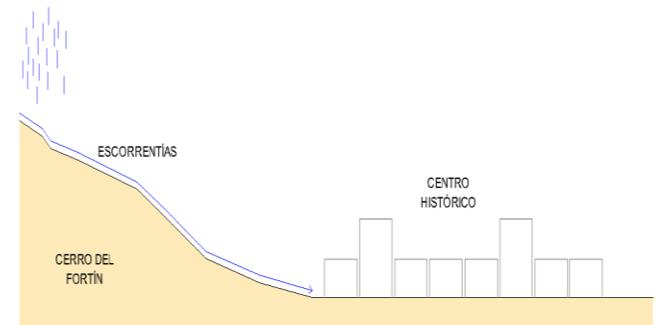
**Figura 3.** Temperaturas anuales promedio en Oaxaca en los últimos 30 años, 1992-2021 (fuente: edición del autor con datos de CONAGUA)

Las características geológicas del área corresponden a rocas de baja permeabilidad, por esta razón, y considerando las pronunciadas pendientes que constituyen las laderas de la sierra y zonas montañosas que rodean al centro histórico de la ciudad, estas microcuencas tienden a ser de respuesta rápida, lo que implica que, ante un

aguacero de media a alta intensidad en las zonas altas, puede representar graves problemáticas, pues la mayoría del agua escurrirá superficialmente y de manera torrencial en un tiempo muy corto, **Figura 4 y 5.**



**Figura 4.** Escorrimientos de laderas (Fuente: edición del autor)



**Figura 5.** Escorrimientos de laderas II (Fuente: edición del autor)

En Oaxaca prevalece una enorme problemática en materia de agua, los centros más grandes del estado, como la ciudad de Oaxaca, enfrentan problemas históricos para abastecer de agua a su población, por falta de disponibilidad y deterioro de la infraestructura de

distribución, donde se desperdicia hasta un 50 por ciento del líquido [8].

En tanto en la zona de estudio, debido a la falta de un sistema adecuado de abastecimiento, la constante escasez del líquido y una demanda creciente de agua en la capital, se necesitó que el ayuntamiento de la ciudad de Oaxaca de Juárez buscara constantemente nuevas opciones de suministro hídrico para la capital del estado.

Aunque las condicionantes físicas y morfológicas de la zona de estudio son complejas, es su comportamiento urbano, específicamente su traza, donde podemos encontrar elementos para mitigar las problemáticas antes descritas.

La red vial reticular que la compone, está mejor conectada y facilita la movilidad de usuarios de las calles, como peatones y ciclistas. Adicionalmente, este tipo de estructura vial da un mayor nivel de confianza a peatones ya que es más intuitiva y fácil de navegar. Permite una mejor administración de la relación volumen/capacidad [9] y suelen ser más viables en el manejo de aguas pluviales urbanas, ya que su regularidad en el trazo permite la implementación y diseño de estrategias de mayor longitud.

Mejorar e intervenir las zonas críticas antes descritas deben ser una prioridad gubernamental y social.

La estructura de la red vial tiene implicaciones importantes en la permeabilidad de la ciudad, ya que su funcionamiento dependerá del número de opciones de ruta disponibles igual que de la conectividad y la capacidad que ofrecen las calles que la integran [9].

## RESULTADOS

Los datos analizados permitieron comprobar la relación existente entre el aumento de las temperaturas y la disminución de precipitación en la zona de estudio.

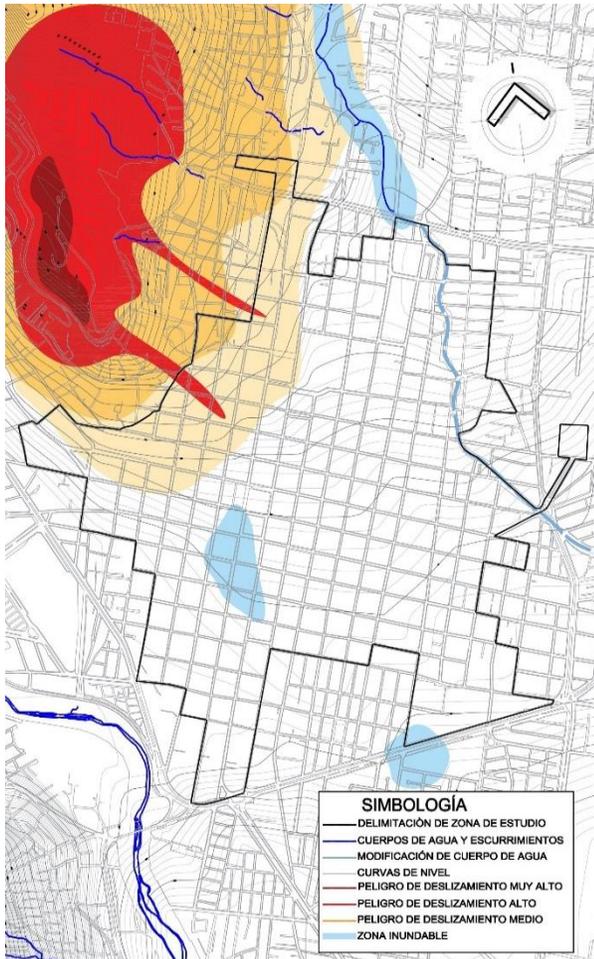
En materia de las condicionantes morfológicas, la zona de estudio presenta graves problemáticas. Las principales son la erosión, deslizamientos e inundaciones. Estas problemáticas fueron expuestas desde el año 2011 en el Atlas de Riesgos del Municipio de Oaxaca de Juárez, sin que hasta el momento se presenten acciones para su mitigación. Esta investigación adopto algunas de las medidas sugeridas en el documento antes citado.

Las abruptas laderas colindantes en la zona norte tienen diversas repercusiones en la zona de estudio. Las pendientes oscilan en el rango de los 45°, dando como resultado zonas con alto rango de deslizamiento.

Estas pendientes provocan rápidas descargas de agua hacia las zonas más bajas, causando primeramente un grave problema de erosión, apoyado por las corrientes de viento y la poca permeabilidad del suelo existente. Por otra parte, aumenta el riesgo de inundación en las zonas bajas como se puede apreciar en la **Figura 6**.

Las aguas pluviales deberían descargarse en los cuerpos de agua perimetrales, sin embargo, debido a las modificaciones en materia de infraestructura y la pérdida de permeabilidad del suelo, estas aguas se

estancan en zonas específicas (partes bajas) del área de estudio, lo cual genera enormes problemas urbanos, además de conflictos de accesibilidad.



**Figura 6.** Problemáticas del estado actual (fuente: edición del autor)

## ESTRATEGIAS

Para la formulación de las estrategias se consideraron las funciones hidrológicas sugeridas por Patagua, Fundación Legado Chile y la Pontificia Universidad Católica de Chile en 2021; estas constan de los siguientes puntos: almacenamiento,

infiltración, reducción de riesgos climáticos, depuración de las aguas, provisión de hábitat y conectividad ecológica y provisión de espacios de recreación [10].

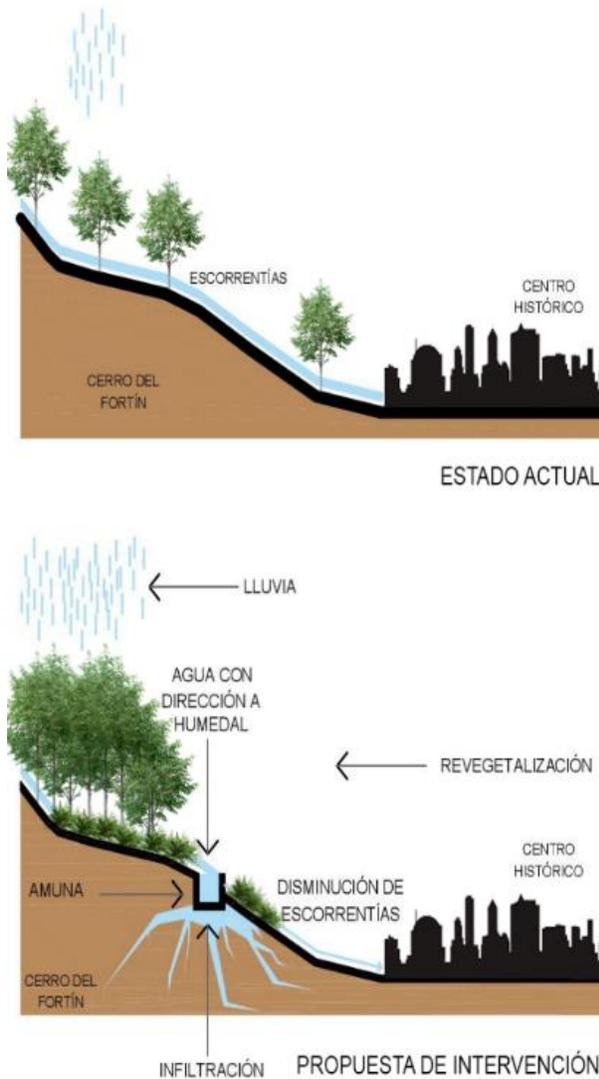
Para la integración de estrategias, se consideraron dos zonas de aplicación. Las medidas externas, se encuentran fuera del polígono del área de estudio, en la zona norte, y su finalidad principal es disminuir la velocidad de las descargas a las zonas bajas, reteniendo y redireccionando el flujo del agua en caso de tormentas o lluvias muy prolongadas, además de hidratar en su recorrido los suelos que actualmente presentan zonas de erosión que van de severas a moderadas, **Figura 7.**

Los escurrimientos provenientes de la zona norte, eran evacuados a los cuerpos situados en dirección sur y este, sin embargo, al existir una gran modificación urbana, las pendientes naturales fueron alteradas y las zonas permeables disminuidas.

La mayor parte de las ciudades del mundo se ubica a las cercanías de un río de cierta entidad que, servía como fuente de abastecimiento y como medio receptor de residuos. A este río se incorporaban otros arroyos y quebradas más pequeños, generalmente de flujo discontinuo que, a medida que las ciudades se expandían y consolidaban, eran percibidos como barreras a la movilidad y como espacios desaprovechados desde el punto de vista de los usos urbanos [11].

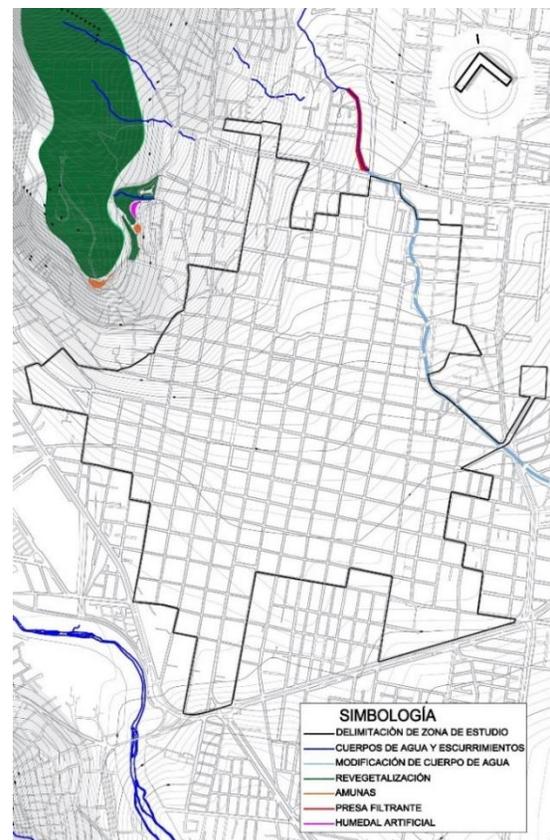
Dentro del área de estudio, en dirección noroeste a suroeste, preexiste el

entubamiento del río Jalatlaco, donde actualmente existe una vía de tres carriles denominada Calzada de la República, que posteriormente en dirección a su flujo, se convierte nuevamente en un cuerpo de agua al aire libre.



**Figura 7.-** Disminución en velocidad de descargas (fuente: edición del autor)

Los sistemas tradicionales de drenaje basados en el uso de infraestructura gris aumentan la vulnerabilidad de las ciudades, promoviendo la impermeabilización de los suelos. Esta pérdida de permeabilidad no solo incrementa los caudales máximos y los volúmenes de escorrentía, sino que también amenaza a los ecosistemas acuáticos y la vida silvestre, al aumentar los niveles de contaminantes en el agua asociados a esa escorrentía (p. ej. aceite, materia orgánica y metales tóxicos) [10]. Para mitigar esta problemática, las estrategias propuestas en esta zona son tres, **Figura 8.**



**Figura 8.** Estrategias externas (fuente: edición del autor)

La primera estrategia es la creación de una presa filtrante, ubicada en la última sección del río San Felipe, antes de que el flujo de agua ingrese al canal artificial. Su orientación debe ser en sentido perpendicular al flujo del agua. Con esta estrategia se busca disminuir la velocidad de la descarga y favorecer la infiltración en los suelos de la zona, que aún no presentan modificaciones artificiales.

La segunda estrategia es la creación de amunas y zanjas de infiltración. Estos elementos deben estar colocados en la zona montañosa colindante. Su principal función será disminuir la velocidad de la descarga a las zonas bajas del área de estudio, mitigar la erosión del suelo, redireccionar el flujo del agua y generar zonas de infiltración.

Por último, la tercera estrategia consta de la creación de humedales artificiales en la zona más estable del pie de montaña, zona donde el agua deberá llegar con menor velocidad y en grandes cantidades cuando se presenten lluvias torrenciales. Estos estanques ayudaran a que los sedimentos gruesos lleguen al fondo de su estructura, permitiendo la reutilización del líquido.

Los humedales artificiales, han demostrado ser capaces de mejorar parámetros de calidad de agua asociados a la contaminación por aguas de lluvia de una forma eficiente gracias a procesos físicos, químicos y biológicos internos de remoción [10].

Las estrategias expuestas, deben acompañarse por un proceso de revegetalización en las zonas más altas de la montaña, con la finalidad de

garantizar un menor porcentaje de erosión, además de disminuir la temperatura en las zonas montañosas, reduciendo el porcentaje de evaporación. Las estrategias internas, son las que como su nombre lo indica, se encuentran dentro del perímetro delimitado al área de estudio, y su finalidad principal es conducir e infiltrar superficialmente el agua pluvial. Para la proyección de estas estrategias, se consideraron los espacios públicos existentes, con la finalidad de no modificar la morfología urbana actual, además de facilitar su implementación.

La primera estrategia interna se basa en el aumento de arborización urbana, principalmente en zonas como parques y áreas peatonales. El aumento de vegetación atenúa la temperatura de los espacios públicos, minimizan el efecto de Islas de Calor en las ciudades y disminuyen el impacto de la radiación solar sobre las edificaciones [12]. Además, reducen el porcentaje de evaporación que se genera al entrar en contacto el agua con superficies como el concreto expuesto al sol directo.

Como segunda estrategia, se propone la utilización de pavimentos permeables en plazas, andadores y en general en zonas de uso peatonal , **Figura 9**.

Estos pavimentos ayudan a la disminución de encharcamientos parciales, además de infiltrar de manera superficial el agua pluvial de la zona.

Uno de los factores urbanos que potencializa las inundaciones en las ciudades es la impermeabilización del suelo. Las superficies duras destinadas a

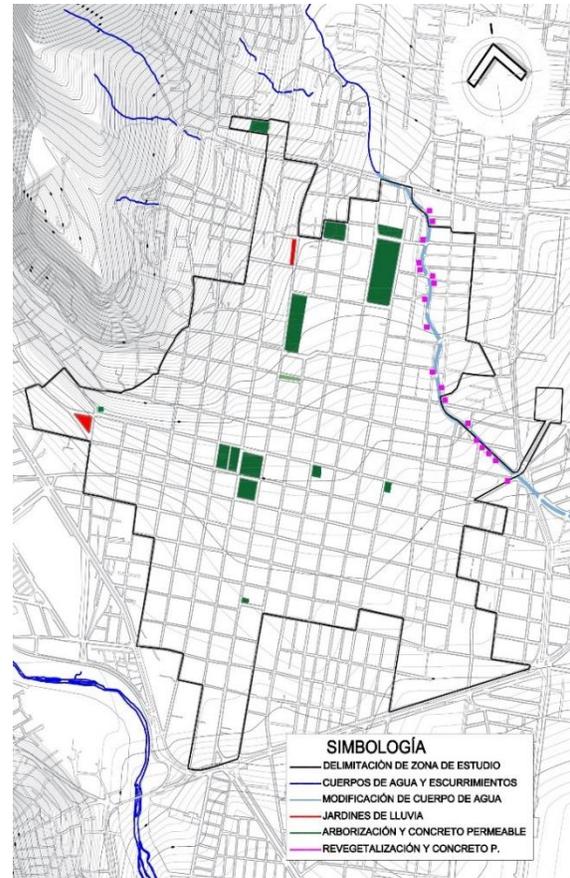
la red vial vehicular, las plazas y plazoletas, el sistema de andenes, las rutas peatonales, las zonas de rodamiento de bicicletas y los parqueaderos, se han construido tradicionalmente en concreto, asfalto o adoquín, todos ellos impermeables [13].

Por último, la implementación de jardines de lluvia deberá instalarse en zonas donde el flujo de agua permita su recolección, ya sea por condicionantes de alto flujo o por las características físicas existentes, considerando como principal factor, la pendiente existente en la zona como punto determinante en la ubicación de esta estrategia.

Los jardines de lluvia retienen la escorrentía de aguas pluviales ayudando a reducir las inundaciones extremas [14].

Las estrategias propuestas fueron adaptadas al entorno morfológico del área de estudio, buscando un equilibrio entre el espacio construido y el propuesto. Comprender los lazos entre las ciudades y el agua es prioritario a la luz del cambio climático y la degradación de los ecosistemas [1].

Con esta serie de estrategias se busca un mejor manejo de las aguas urbanas, recolectadas y pluviales ante su inminente disminución. Reconectar y recuperar los entornos naturales ante los urbanos, es la mejor manera de aminorar y remediar el enorme daño al ecosistema derivado del proceso de urbanización.



**Figura 9.** Estrategias internas (fuente: edición del autor)

## CONCLUSIONES

Las estrategias sustentables para la gestión y el aprovechamiento del agua pluvial urbana propuestas en la zona del Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca, buscan recuperar las zonas de infiltración naturales, por medio de procesos como la renaturalización, jardines de lluvia e infraestructura verde, mitigando los problemas encontrados en el área, como son la falta de espacios verdes, inundaciones y realimentación de mantos freáticos.

La implementación de estas estrategias ayudará a la resiliencia del área de estudio ante los constantes cambios provocados por el calentamiento global y el crecimiento poblacional.

Es tarea de todos los sectores de la sociedad el correcto uso del agua, sin embargo, los actores políticos deben intervenir de manera inmediata en acciones y decisiones que beneficien la conservación, reutilización y distribución del vital líquido.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, así como a los colaboradores en la realización y revisión de este artículo, pero principalmente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la asignación de beca nacional.

## REFERENCIAS

- [1] Aguilar Barajas, Ismael & Mahlkecht, Jürgen & Kalledin, Jonathan & Kiellén, Marianne & Mejía, Abel. (2016). Agua y Ciudades en América Latina - Retos para el Desarrollo Sostenible.
- [2] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua (2019) Estadísticas del Agua en México, documento técnico.
- [3] Nava, Luzma Fabiola, & Medrano Pérez, Ojilve Ramón. (2019). Retos y oportunidades de la gestión de los recursos hídricos subterráneos: Aproximación al

problemático acceso al agua en Valles Centrales de Oaxaca, México. Acta universitaria, 29, e2429. Epub 11 de septiembre de 2020. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2429>

- [4] Municipio de Oaxaca de Juárez & Instituto de Geología de la UNAM. (2011). Atlas de Riesgos del municipio de Oaxaca de Juárez.
- [5] Topete Pozas, Olivia, "El abasto de agua potable en la ciudad de Oaxaca de Juárez a finales del siglo XIX y principios del XX", Revista Pueblos y fronteras digital, Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones Multidisciplinarias sobre Chiapas y la Frontera Sur, Chiapas, v. 12, n. 24, diciembre de 2017 a mayo de 2018, p. 136-162. DOI: <https://doi.org/10.22201/cimsur.18704115e.2017.24.319>
- [6] Escobar Ohmstede, Antonio, & Topete Pozas, Olivia P. (2020). El agua y su legislación. Acuerdos y conflictos en los Valles Centrales de Oaxaca (México), en la transición del siglo XIX al siglo XX. Mundo agrario, 21(48), 150. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.24215/15155994e150>
- [7] Molina Prieto, L., Villegas Rodríguez (2015). Ciudades sensibles al agua: paradigma contemporáneo. Revista de Tecnología, ISSN 1692-1399, Vol. 14, N°.1
- [8] Unam, (2010), PADHPOT. Recuperado de;

<http://www.agua.unam.mx/padhpo/t/oaxaca.html>

[9] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), (2020) Curso de Calles e Infraestructura Verde, Manual del participante

[10] Patagua, Fundación Legado Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile. (2021). Ciudades sensibles al agua. Guía de drenaje Urbano Sostenible para la Macrozona Sur de Chile.

[11] García, E., Suárez, G., Esquivel, M., Ruíz, A., Zuloaga, D y Chevalier, O. (2019). Bases generales para el desarrollo de estudios de reducción de riesgos hidrológicos en ciudades, Lecciones aprendidas de la iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles ante el reto del cambio climático en Latinoamérica y el Caribe. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático (CCS), División de Medio Ambiente, Desarrollo Rural y Administración de Riesgos por Desastres (RND), División de Vivienda y Desarrollo Urbano (HUD), Banco Interamericano de Desarrollo

[12] Vargas-Gómez, O. ., & Molina-Prieto, L. (2014). Arborizaciones urbanas: estrategia para mitigar el calentamiento global. REVISTA NODO, 8(16), 99 - 108. Recuperado a partir de <https://revistas.uan.edu.co/index.php/nodo/article/view/103>

[13] Molina-Prieto, L. (2016). Resiliencia a inundaciones: nuevo

paradigma para el diseño urbano. Revista de Arquitectura, 18(2), 82-94.

doi:10.14718/RevArq.2016.18.2.8

[14] Banco Interamericano de Desarrollo. (2020). Mejorando la Resiliencia de la Infraestructura con Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN). KI: LI.