

Sistema urbano de drenaje sostenible (SUDS) como motor de crecimiento de espacios vegetados urbanos

Sustainable urban drainage system (SUDS) as an engine for growth of urban vegetated spaces

A. M. Martínez-Núñez ^a, I. E. Castañeda-Robles ^a, M. V. Rómulo-Hernández ^{a,*}

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

El agua es un recurso vital para el desarrollo humano y económico, enfrenta el reto de la calidad de las aguas pluviales y su impacto ambiental, además, de acuerdo con el Fondo Mundial para la Naturaleza para el año 2025, dos tercios de la población mundial podrían enfrentar escasez de agua, por lo que se vuelve importante los enfoques sustentables para la gestión de las aguas pluviales que garanticen su disponibilidad a largo plazo. Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) ofrecen una alternativa viable para gestionar las aguas pluviales de forma sostenible, teniendo en cuenta las repercusiones medioambientales y sociales. Implementar sistemas de drenaje sostenible en áreas urbanas, es crucial para garantizar una gestión adecuada y sostenible de nuestros recursos hídricos, y reducir los riesgos asociados con eventos climáticos extremos, como lluvias intensas e inundaciones. Este trabajo, propone un sistema con potencial relevante para contribuir con nutrientes en el agua de riego a los jardines urbanos y rurales, con altas tasas de eficiencia de crecimiento en los cultivos, derivado de los niveles de fosfato y nitrato corroborados a través de mediciones de pH, conductividad eléctrica, fosfato y nitrato, que se aportan a través de un filtro en el agua de lluvia capturada, que se incorpora a un sistema hidropónico.

Palabras Clave: Agua, SUDS, Escasez, Infraestructura.

Abstract

Water is a vital resource for human and economic development, it faces the challenge of rainwater quality and its environmental impact, in addition, according to the World Wildlife Fund by 2025 two-thirds of the world's population may be facing water shortages, and sustainable approaches to stormwater management are needed to ensure long-term availability. Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) offer a viable alternative to managing stormwater sustainably, considering environmental and social impacts. Implementing sustainable drainage systems in urban areas is crucial to ensure adequate and sustainable management of our water resources and to reduce the risks associated with extreme weather events, such as heavy rains and floods. This work proposes a system with the relevant potential to contribute nutrients in irrigation water to urban and rural gardens, with high growth efficiency rates in crops, derived from the levels of phosphate and nitrate measured through pH, electrical conductivity, and phosphate and nitrate, which are provided through a filter in the captured rainwater, which is incorporated into a hydroponic.

Keywords: Water, SUDS, Scarcity, Infrastructure.

1. Introducción

Desde tiempos ancestrales, el agua ha sido el factor determinante del crecimiento de los asentamientos humanos y de la realización de la totalidad de las actividades productivas. El futuro del país dependerá radicalmente de la forma de aprovechar este recurso vital. El gran desafío surge, de la necesidad de satisfacer la demanda de agua para la expansión urbano-industrial, al tiempo de impulsar la mayor producción y productividad en la actividad agrícola y de atender las demandas de bienestar en el ámbito rural (Solanes & Jouravlev, 2005).

Existe un número de 29 regiones en el mundo que sufren escasez de agua, esto debido a que el uso de este recurso ha crecido más del doble en relación con la tasa de incremento poblacional en el último siglo. Cerca de una quinta parte (1,200 millones) de la población mundial de 6 mil millones de personas, habita en áreas que enfrentan escasez de agua, y otro cuarto de la población mundial (1,600 millones) enfrenta recortes en el suministro de agua debido a que carecen de la infraestructura necesaria para tomar agua de los ríos y acuíferos (ONU, 2005). La escasez de agua representa para muchos países el desafío más acuciante para el desarrollo socioeconómico y humano en general.

*Autor para la correspondencia: ro391881@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: ma316293@uaeh.edu.mx (Adriana Michelle Martínez Núñez), ivan_castaneda@uaeh.edu.mx (Iván Erick Castañeda Robles), ro391881@uaeh.edu.mx (Maydaly Virginia Rómulo Hernández).

La evolución de las infraestructuras de drenaje y saneamiento de una ciudad se inició mediante la canalización y control de las aguas residuales; posteriormente, encauzando las escorrentías producidas por las aguas de tormenta tendiendo a limitar el riesgo de sufrir inundaciones. Todo ello ha dado lugar a los sistemas convencionales de saneamiento y drenaje en las ciudades, basados en colectores cuyo objetivo primordial es evacuar lo antes posible las escorrentías generadas en tiempo de lluvia hacia el medio receptor. Resueltos a priori estos problemas, aparece recientemente otro, el de la calidad de las escorrentías urbanas en tiempo de lluvia y el impacto que sus vertidos generan en el medio receptor. Hoy en día las aguas de lluvia, lejos de ser aguas limpias, son una fuente importante de contaminación, máxime si la red es unitaria y más aún cuando los índices de urbanización superan las planificaciones iniciales. (CONAGUA 2018).

La expansión de los núcleos urbanos conlleva una progresiva impermeabilización del suelo con incidencia directa y negativa en el ciclo hidrológico natural del agua. Estas nuevas exigencias hacen necesario un nuevo enfoque para la gestión de las escorrentías, lo cual ha llevado al interés creciente por el uso de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), también designados BMP's (Best Management Practices) o WSUD (Water Sensitive Urban Design), o actuaciones genéricas en el marco del RH (Rainwater Harvesting). Éstos comprenden un amplio espectro de soluciones que permiten afrontar el planeamiento, diseño y gestión de las aguas pluviales dando tanta importancia a los aspectos medioambientales y sociales como a los hidrológicos e hidrogeológicos (Grifeu, 2018).

Los SUDS pueden utilizarse como alternativa a los sistemas de drenaje convencional o en combinación con ellos. Los principales problemas que emergen en los sistemas convencionales de drenaje pueden resumirse en los siguientes (Philip, 2011): descargas de sistemas unitarios (DSU); contaminación difusa; costes de la gestión centralizada; desperdicio de un recurso potencialmente aprovechable; incremento de caudales aguas abajo. Además, los efectos del cambio climático podrían producir impactos adicionales en los próximos años, causados por períodos más frecuentes de lluvias intensas.

- **Contaminación difusa:** Cuando el agua golpea la superficie de la tierra, disuelve y arrastra un conjunto de contaminantes naturales o producidos por el hombre. Ocasionando esto que el agua limpia de lluvia se convierta en un agua contaminada a depurar.

- **Inundaciones:** se producen por el criterio de diseño tradicional, así como la errónea costumbre de depositar residuos sólidos en las calles y vialidades de la ciudad. Estos criterios son, culpables, de que los sistemas convencionales de gestión de las aguas pluviales fallen, produciendo en aquellos puntos más bajos de la ciudad inundaciones por la acumulación de una cantidad enorme de agua en un corto periodo de tiempo, pues los dispositivos de drenaje dispuesto presentan un diseño inferior al requerido para el volumen acumulado. Un ejemplo claro fue la inundación registrada el 24 de junio de 1949, donde una fuerte tromba generó grandes volúmenes de escurrimiento hacia la ciudad de Pachuca Hidalgo por el río de Las Avenidas, la falta de

mantenimiento al cauce junto con el arrastre de materiales provocó una reducción de la capacidad de conducción y posteriormente su desbordamiento. (Oliver, 2004). Ver figura 1



Figura 1. Inundación registrada el 24 de junio de 1949, en la ciudad de Pachuca de Soto, Hidalgo, México. Fuente: www.pachucavive.com

- **Desnaturalización:** La ausencia de áreas verdes y la creciente presión urbanística, hace que el ciclo natural del agua se vea alterado de una forma muy importante, convirtiendo a las ciudades en áreas semidesérticas, se impide la recarga de acuíferos, que sirven de reserva de agua para el consumo humano, y se genera el efecto isla de calor, que hace que las temperaturas en verano se incrementen en el interior de la ciudad. Todos estos inconvenientes repercuten a nivel medioambiental, económico y social poniendo en riesgo inclusive el bienestar de los ciudadanos.

El crecimiento de las zonas impermeables en las ciudades modifica los flujos naturales del ciclo hidrológico, tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo. La reducción de espacios vegetados reduce en primera instancia la interceptación natural y la evapotranspiración. El aumento de la impermeabilidad redundante en una reducción de la infiltración. Como consecuencia de todo ello, se generan volúmenes de escorrentía netamente mayores acelerando los tiempos de respuesta, e incrementando el riesgo de inundaciones.

La degradación de la calidad del agua contribuye a la escasez de este recurso. Este es un aspecto importante en el manejo de los recursos hídricos, el cual ha sido tratado con negligencia. La mala calidad del agua tiene múltiples consecuencias para la salud y el medio ambiente, que vuelven al recurso no apto para su uso, dando como resultado la reducción en la disponibilidad de recursos hídricos. En efecto, la contaminación del agua ha devenido en una de las grandes amenazas para la disponibilidad y reúso del agua dulce. La acelerada urbanización, el incremento en las actividades agrícolas, el uso de fertilizantes y plaguicidas, la degradación del suelo, las altas concentraciones de población y la deficiente eliminación de desechos afectan la disponibilidad de los recursos de agua dulce.

La evolución natural de los sistemas urbanos de drenaje sostenible y los muros verdes ha llevado a considerar la implementación de sistemas hidropónicos para el cultivo de plantas. La técnica hidropónica consiste en el cultivo de plantas sin tierra, proporcionándoles los nutrientes necesarios por medio de una solución disuelta en agua. Los sistemas hidropónicos pueden ser utilizados en muros verdes como una forma sostenible de cultivo en áreas urbanas. Los muros verdes, además de su valor estético y ambiental, mejoran el confort térmico y acústico, reducen la radiación solar, el

efecto isla de calor y las emisiones de gases de efecto invernadero. Por otro lado, los sistemas hidropónicos permiten el cultivo de plantas sin suelo, lo que ahorra espacio y es más eficiente en el uso del agua y los nutrientes, ver figura 2.



Figura 2. Sistema hidropónico. Fuente: <https://es.pureaqua.com/tratamiento-de-agua-hidroponica/>

No sólo a nivel local, sino alrededor de todo el mundo se ha despertado la necesidad de la implementación de nuevas técnicas de drenaje para la gestión del agua de una forma eficiente, los SUDS buscan imitar el proceso natural del ciclo del agua, previos a la urbanización. Además, en los últimos años se ha delineado una tendencia hacia la implementación de infraestructuras verdes, que buscan mejorar la calidad ambiental de las áreas urbanas. Los muros verdes son un ejemplo de este tipo de infraestructura vegetal que pueden ser utilizados para el control del clima, la calidad del aire, el ahorro energético y la biodiversidad en zonas urbanas. Ciudades como Cúcuta en el país de Colombia solo cuentan con alcantarillado sanitario, ocasionando que el manejo de las aguas pluviales sea deficiente, debido a esto se propuso un caudal para el drenaje pluvial de $8.48 \text{ m}^3/\text{s}$, y se optó por dividir el sistema en dos partes para optimizar el diseño. (Cely-Calixto, N. J., 2022). Entre otras y como es de esperarse en uno de los países más desarrollados del mundo, en Barcelona el Instituto Municipal de Urbanismo de Barcelona ha ido desarrollando obras para la implementación de SUDS en el espacio público con el objetivo de gestionar la escorrentía de forma alternativa y autónoma a los sistemas unitario. Ver figura 3.



Figura 3. Ejemplo de Sistemas de Desarrollo Sustentable en Barcelona. Fuente: <https://drenajesostenible.com/>

En un trabajo realizado por Fletcher et. al, (2015), se definen diferentes tipologías de SUDS que se deben seleccionar en función de sus conocidas tasas de remoción de nutrientes (nitrógeno y fósforo) y sólidos suspendidos. Este estado en particular presenta metodologías ya definidas y se pretende promover el uso sustentable de las aguas superficiales para satisfacer las diversas necesidades en condiciones cambiantes de escasez y aplicar medidas de adaptación al cambio climático. Para ello, se presenta una

alternativa de SUDS basada en el análisis de datos obtenidos de un sistema de aprovechamiento de agua de lluvia. Se analizan muestras para conocer los aspectos positivos y negativos del riego con agua pluvial, una vez que ha pasado por el sistema de filtros propuestos, teniendo en cuenta los aspectos técnico-económicos para el desarrollo final del diseño aplicado en un sistema hidropónico que permita aumentar los espacios vegetados y beneficiar, en primera instancia, la intercepción natural y la evapotranspiración.

La problemática planteada da origen a la necesidad de afrontar la gestión de las aguas pluviales desde una perspectiva diferente a la actual, que combine aspectos hidrológicos, medioambientales y sociales. El surgimiento de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), tiene como propósito tratar esta problemática, su propósito reproducir el ciclo hidrológico natural previo a la urbanización o actuación de la forma más parecida posible minimizando los impactos del desarrollo urbano entre ellos, calidad y cantidad de escorrentía (en origen, transporte y destino), y aunado a esto maximizar la integración de paisaje y valores sociales y ambientales. (Joseba, Jorge, Elena 2016)

2. Alcances

En este manuscrito, se presentan las hipótesis y resultados de la información obtenida de diversas fuentes bibliográficas y virtuales referentes a los SUDS. También se consideran propuestas basadas en la experimentación realizada en el laboratorio de materiales de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, ubicada en el kilómetro 4.5 de la carretera Pachuca-Tulancingo, en la Colonia Carboneras de Mineral de la Reforma, en el Estado de Hidalgo.

Por otro lado, para el predimensionamiento del sistema, se utilizaron guías de diseño realizadas en otras partes del mundo, adaptándolas a las condiciones de la región. Con base en estos resultados, se definirá la factibilidad de la implementación de los SUDS adaptando un sistema de captación de agua de escorrentía estudiando sus características.

3. Metodología y materiales

La parte experimental de este trabajo consta de 5 etapas a partir del sistema de captación de agua propuesto (Figura 4) y se describen a continuación:

3.1 Captación de agua de lluvia

La superficie de captación fue de 6m^2 , correspondiente a la dimensión establecida en el tejado de una casa habitación que cuenta con una pendiente del 5%.

La (CONAGUA, 2016) establece lineamientos técnicos para sistemas de captación de agua de lluvia con fines de abasto de agua potable a nivel vivienda, en ellos se menciona que la pendiente mínima requerida para que el agua escurra adecuadamente puede variar dependiendo del contexto y del sistema de drenaje utilizado. Sin embargo, en general, se

considera que una pendiente mínima del 2% es suficiente para drenar el agua captada de manera adecuada.

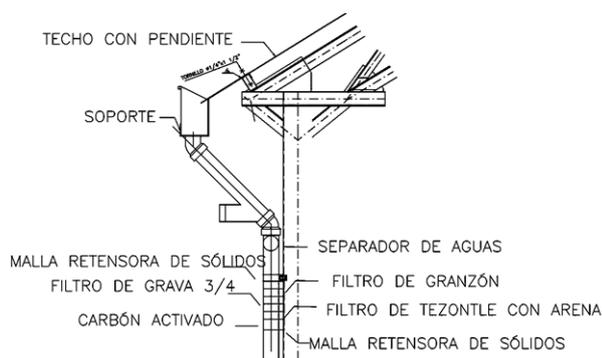


Figura 4. Propuesta inicial de materiales propuestos para el filtro. Fuente: elaboración propia

3.2 Pesaje de los materiales

Utilizando una báscula digital con un sensor de alta precisión, se pesaron los materiales a utilizar: tierra, grava agregada fina y gruesa, y carbón activado. Para cada etapa del filtro, se utilizó un tubo de PVC (Policloruro de vinilo) de 3" de diámetro y una longitud de 3.94". Los materiales pétreos fueron extraídos de diferentes bancos ubicados en la región de Pachuca, Hidalgo.

Tabla 1. Selección de materiales

Material	Banco proveniente
Grava $\frac{3}{4}$	Cerro el Judío (20.132645, -98.823618)
Grava $\frac{1}{4}$	Cerro el Judío (20.132645, -98.823618)
Tezontle	KM. 85 (20.090753, -98.795385)
Carbón activado	Desecho industrial proveniente de industria refresquera
Arena	Cerro el Judío (20.132645, -98.823618)

3.3 Determinación de permeabilidad

Se vertieron 140 mililitros de la muestra de agua en el primer filtro y así sucesivamente hasta pasar por los cuatro agregados, se tomó el tiempo que está tarda en salir para determinar su coeficiente de permeabilidad, así como el grado de absorción de cada material, ver figura 5.



Figura 5. Materiales propuestos para el filtro

3.4 Pruebas de laboratorio

Se realizó una prueba de pH a la muestra de agua que se recolectó, antes de introducirla en los filtros, así como a la muestra de salida. Se utilizó el equipo HI-2550-01 HANNA para medir el pH.

También se llevó a cabo una prueba de conductividad eléctrica en la muestra de entrada y salida para hacer una comparativa. El instrumento utilizado fue el medidor multiparamétrico HI-2550-01 HANNA, un preciso medidor de sobremesa con dos canales de entrada. Este medidor es capaz de medir hasta siete parámetros, incluyendo pH, ORP (potencial de oxidación y reducción), ISE (electrodo selectivo de iones de cloruro), EC (conductividad eléctrica), TDS (total de sólidos disueltos), salinidad y temperatura. El equipo viene con un electrodo de pH, una sonda de conductividad de 4 anillos HI-76310 y una sonda de temperatura para medir la compensación automática de la temperatura de vidrio HI-113IB. El rango de medición de la conductividad eléctrica tiene una precisión de 0.00 a 29.99 $\mu\text{s}/\text{cm}$; 30.00 a 299.9 $\mu\text{s}/\text{cm}$; 300 a 2999 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

De acuerdo con el departamento de agricultura de estados unidos de Norteamérica por sus siglas en inglés, USDA (2021), la conductividad eléctrica se relaciona con la cantidad de iones cargados presentes en el agua. Estos iones se generan a partir de compuestos disueltos en el agua, como sales, ácidos y bases. La conductividad eléctrica es un indicador importante de la salinidad del agua, lo que puede tener implicaciones significativas en la calidad del agua y su idoneidad para diferentes aplicaciones.

La siguiente prueba fue la de fosfato y nitrato, utilizando el procedimiento correspondiente con un fotómetro de banco multiparamétrico para pruebas ambientales HI-83206. Es importante destacar que estos dispositivos cuentan con un manual que contiene las instrucciones para cada procedimiento. Realizar estas pruebas es importante para evaluar la calidad general del agua, ya que una cantidad excesiva de estos nutrientes en ríos, lagos y otras fuentes de agua puede resultar en la eutrofización, un proceso en el que se produce un crecimiento excesivo de algas, bacterias y otros microorganismos en el agua. Esto puede llevar a un alto consumo de oxígeno en el agua y, en última instancia, a la muerte de la vida acuática.

3.4 Desarrollo de sistema hidropónico vertical

Para finalizar, se elaboró un sistema hidropónico vertical con un tubo de 4" de diámetro por 39.37" de largo, tapas de PVC en ambos extremos de la tubería, una bomba sumergible con una potencia de 25 watts y una altura máxima de elevación de 78.74". Se utilizó una manguera de $\frac{1}{2}$ " por 51.18" de longitud, una cubeta de plástico de 20 litros de capacidad con tapa y canastillas para colocar las plantas y observar su desarrollo utilizando agua pluvial y agua proveniente del filtro.

Se realizaron 12 cortes en el tubo con la ayuda de una segueta, con una separación de 5.91". Se hicieron 6 cortes en

un lado del tubo y otros 6 en el otro lado. La separación entre los cortes en lados opuestos es de 2.95". Luego, se calentaron las aberturas con una pistola de calor y se moldeó el tubo alrededor de una botella de vidrio. Este material puede ser reemplazado por un objeto cilíndrico resistente al calor con un diámetro no mayor a 2.33" ni menor a 1.57", ver figura 6.

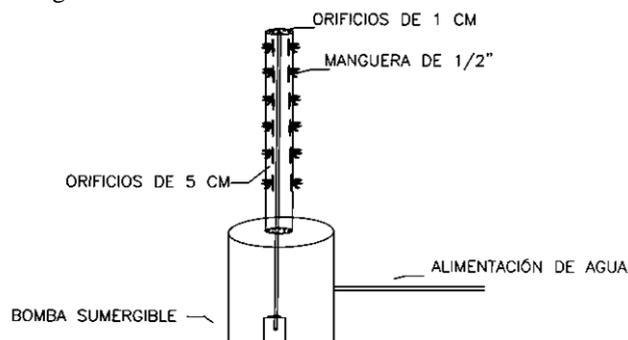


Figura 6. Sistema hidropónico vertical

Las tapas se colocaron en ambos extremos del tubo de manera inversa, como se observa en la ilustración. Con un taladro, se perforaron 8 orificios de 1 cm de diámetro y uno de 1/2" en el centro para introducir la manguera que se encargará de llevar el agua del filtro a la parte superior. Los orificios drenan el agua almacenada para que caiga en forma de lluvia sobre las canastillas, las cuales están previamente perforadas, manteniendo así un riego permanente y uniforme.

4. Resultados

4.1 Pesaje de materiales

Los resultados obtenidos durante el periodo experimental muestran la viabilidad de la implementación del sistema, debido a los parámetros obtenidos. En primera instancia, los resultados que se encuentran en la tabla que se muestra a continuación son producto de pesar en una balanza digital uno a uno los materiales propuestos para el filtro, ver tabla 2.

Tabla 2. Resultados de los pesajes obtenidos con balanza digital de los materiales seleccionados en la columna.

Material	Peso del tubo de pvc (gramos)	Peso con material (gramos)
Grava $\frac{3}{4}$	99.8	549.4
Grava $\frac{1}{4}$	99.8	530.2
Arena mezclada con tezontle porción 3:2	99.8	537.4
Carbón activado	99.8	285.9

Los datos que se obtuvieron en las pruebas de permeabilidad y absorción se encuentran en la siguiente tabla, se hicieron 2 pruebas a cada material para identificar el porcentaje de absorción de estos, se puede notar la

diferencia entre tiempos de entrada y salida, así como la cantidad de mililitros a la salida, ver tabla 3.

Tabla 3: Resultados de permeabilidad de cada material

Material	Mililitros introducidos	Mililitros salida	Tiempo de salida
Granzón	140	130	25s:11ms
	140	135	19s:71ms
Grava $\frac{3}{4}$	140	140	41s:37ms
	140	137	43s:93sm
Arena con tezontle en proporción 1:5	140	20	13m:09s
	140	56	13m:09s:33ms
Carbón activado	140	19	1m:05s:34ms
	140	134	2m:15s:01ms

En cuestión al Fosfato, existen dos tipos de pruebas: rango bajo y rango alto. La diferencia entre la prueba de fosfato rango alto y rango bajo es la sensibilidad de la medición. La prueba de fosfato rango bajo tiene una mayor sensibilidad, por lo que puede detectar niveles más bajos de fosfato en una muestra. Por otro lado, la prueba de fosfato rango alto tiene una menor sensibilidad y se usa para medir niveles más altos de fosfato.

El resultado de entrada de la prueba de rango alto fue de 1.7 mg/L y salida de 3.0 mg/L. Para la prueba de rango bajo, los resultados obtenidos fueron los siguientes: entrada, 0.00 mg/L y salida 0.55 mg/L, ver figura 7.



Figura 7. Muestra obtenida de la prueba de Fosfato Rango Alto (Lado izq). Muestra obtenida de la prueba de Fosfato Rango Bajo (lado derecho)

La prueba de nitrato arrojó resultados de entrada de 1.5 mg/L y de salida de 11.1 mg/L. Es posible notar que el agua que sale del filtro está enriquecida con niveles de nitrato y fosfato. Estos elementos son dañinos para los seres humanos, ya que son derivados de compuestos químicos utilizados en actividades agropecuarias. La concentración máxima permitida para fuentes de agua potable está en un rango de 5 mg/L para nitratos y 0.1 mg/L para fosfatos. Sin embargo, el

nitrate es un fertilizante mineral importante para el desarrollo de las plantas, por lo que podría ser utilizado como un biofertilizante, especialmente en la industria agrónoma.

El nitrato es una fuente importante de nitrógeno, que es un componente esencial en la formación de proteínas, clorofila, ADN y otros componentes celulares de las plantas. Por otro lado, los fosfatos son necesarios para la formación de ATP, que es importante para el transporte de energía en las plantas, así como para la formación de la estructura de la célula y la división celular.

Se adquirieron plántulas de la especie denominada *Lactuca sativa*, comúnmente conocida como lechuga romana, que tenían aproximadamente 20 días de germinación (Figura 8). Con el sistema propuesto, se realizaron mediciones de la calidad del agua y parámetros que nos permiten evaluar el crecimiento y las características de las plantas en comparación con otro grupo al cual no se le suministró agua proveniente del filtro.

Luego de 4 días posteriores al trasplante, se observa un desarrollo importante en la planta, aparición de nuevas hojas y un incremento en su longitud de al menos 4 centímetros y después de tan solo una semana es posible notar un incremento de volumen y crecimiento de nuevas hojas con una longitud máxima de 13 centímetros, ver figura 9. Cabe señalar que el color de la planta que se encuentra alimentada por el agua producto del sistema es de un tono más verde y el desarrollo de la misma es abismalmente superior a la planta que sólo está recibiendo agua de lluvia, es posible entender esto pues regularmente en los sistemas hidropónicos se suministra una solución de agua que contiene los nutrientes adecuados, al no ser agua enriquecida la planta presenta un crecimiento nulo al no poder llevar a cabo su ciclo habitual de desarrollo mientras que su contraparte está obteniendo minerales y compuestos importantes.



Figura 8. Plántula de *lactuca sativa*



Figura 9. Comparativa de *lactuca sativa* con suministro de agua proveniente del sistema de filtración (lado izq.), contra misma especie regada con agua pluvial.

5. Conclusiones

La propuesta presentada, ofrece una alternativa de solución a la problemática de la urbanización, la cual afecta al ciclo hidrológico natural al aumentar los caudales y disminuir los tiempos de retardo. Se produce un aumento de las inundaciones en las zonas urbanas y una degradación del medio ambiente en términos de erosión acelerada y aumento de la contaminación.

El diseño y la gestión de zonas verdes, tanto urbanas como rurales, son herramientas versátiles y eficaces en la lucha contra los problemas medioambientales de las ciudades y en la búsqueda de su sostenibilidad. Los jardines urbanos poseen un elevado potencial de generación de beneficios, como la reducción de la contaminación del agua de lluvia al convertirse en escorrentía urbana, la reducción de las islas de calor en los techos de las viviendas, la producción de hortalizas durante todo el año y el aumento de elementos fertilizantes a partir de residuos industriales y materiales pétreos naturales.

Por lo tanto, el siguiente paso en el proceso de investigación con el trabajo presentado, para hablar de una implementación se requiere valorar costes de los jardines urbanos relacionándolos con los beneficios estimados, en la forma propuesta en el actual trabajo. Buscando la generación de herramientas a las autoridades municipales a la hora de diseñar y apoyar en la implementación de nuevas zonas verdes que estarían a cargo de particulares y del municipio.

Los huertos urbanos suelen utilizar composta como fuente de nutrientes, a menudo en niveles que superan las demandas de nutrientes de los cultivos. La hidroponía tiene muchas ventajas en comparación con la agricultura tradicional, ya que no necesita tierra o suelo para cultivar, ya que el agua es la base más importante. Sin embargo, el exceso de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo puede causar problemas de eutrofización, por lo que es necesario regular el exceso de estos nutrientes.

El diseño propuesto aquí sugiere el suministro de nutrientes a través de un filtro en el agua de lluvia capturada, que se incorpora a un sistema hidropónico y se evalúa posteriormente en el crecimiento de hortalizas. Este sistema es potencialmente importante en la contribución de nutrientes para jardines urbanos y rurales, con altas tasas de eficiencia de crecimiento en las hortalizas. Poner en marcha sistemas urbanos de drenaje sostenible en el estado de Hidalgo es importante para garantizar la gestión adecuada y sostenible de los recursos hídricos que tenemos, y reducir los riesgos asociados con eventos climáticos extremos, como lluvias intensas e inundaciones.

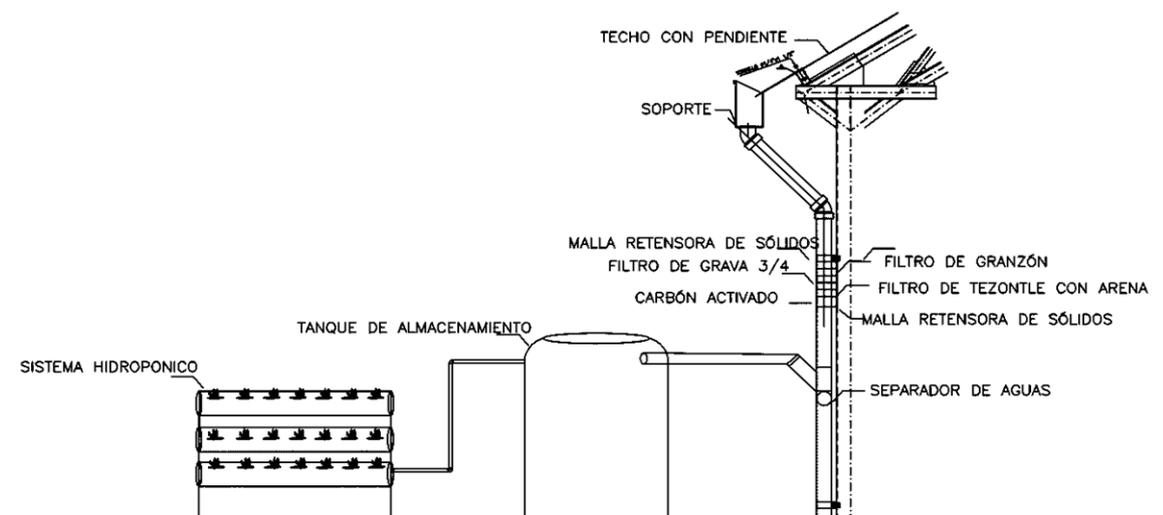


Figura 10. Elaboración propia, propuesta de captación de agua para su aprovechamiento en un sistema hidropónico.

6. Referencias

- Cely-Calixto, N. J. (2022). Propuesta de un sistema urbano de drenaje sostenible para reducir los niveles de inundación en la ciudad de Cúcuta, Colombia. *Eco Matemático*, 13(2), 6-17.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (28 de junio de 2019). La inundación registrada el 24 de junio de 1949 es considerada uno de los mayores desastres en la ciudad. México. Gobierno de México. Recuperado de <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/70-anos-de-la-gran-inundacion-en-pachuca-hidalgo>.
- CONAGUA, C. D. A. (2016). Lineamientos técnicos: Sistema de captación de agua de lluvia con fines de abasto de agua potable a nivel vivienda. Programa nacional para captación de agua de lluvia y ecotecnias en zonas rurales (PROCAPTAR), (1).
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2018). Estadísticas del agua en México 2018.
- Joseba, et al. (18 de enero de 2016). Rainfall–Runoff Simulations to Assess the Potential of SuDS for Mitigating Flooding in Highly Urbanized Catchments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. Recuperado de <https://www.mdpi.com/1660-4601/13/1/149>.
- Molina et al, M. (diciembre de 2011). Sistemas urbanos de drenaje sostenible. Bogotá. Alcaldía mayor de Bogotá. Recuperado de http://observatoriaigua.uib.es/repositori/suds_colombia_suds.pdf.
- ONU, ed. (2005). La escasez del agua. URL: <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/scarcity.shtml>.
- Philip, R. (2011). Module 4. Stormwater- Exploring the options. SWITCH Training Kit. Integrated urban water management in the city of the future. [Online] SWITCH Project. ICLEI European Secretariat GmbH.
- Solanes, M., & Jouravlev, A. (2005). Integrando economía, legislación y administración en la gestión del agua y sus servicios en América Latina y el Caribe. CEPAL.
- Tim D. Fletcher, William Shuster, William F. Hunt, Richard Ashley, David Butler, Scott Arthur, Sam Trowsdale, Sylvie Barraud, Annette Semadeni-Davies, Jean-Luc Bertrand-Krajewski, Peter Steen Mikkelsen, Gilles Rivard, Mathias Uhl, Danielle Dagenais & Maria Viklander (2015) SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage, *Urban Water Journal*, 12:7, 525-542, DOI: 10.1080/1573062X.2014.916314