



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

POSGRADO

Tema: Diseño de un sistema de riego, para implementarse en el Parque Ecológico Cachipamba, ubicado en el sector La Matriz del cantón Saquisilí, Provincia de Cotopaxi, bajo un sistema SUDS.

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del Título de Cuarto Nivel de Magister en
Hidráulica con Mención en Obras Hidráulicas

Modalidad del Trabajo de Titulación: Artículos Profesionales de Alto Nivel

Autor: Ing. Diego Fernando Pérez Moreno

Director: Ing. Myriam Marisol Bayas Altamirano Mg.

Ambato – Ecuador

2025

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

El Tribunal receptor del Trabajo de Titulación, presidido por Ing. Santiago Paul Cabrera Anda Mg., e integrado por los señores: Ing. Lenin Rafael Maldonado Narváez Mg., Ing. María Gabriela Soria Pugo Mg., designados por la Unidad Académica de Titulación del Centro de Posgrados de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: “Diseño de un sistema de riego, para implementarse en el Parque Ecológico Cachipamba, ubicado en el sector La Matriz del cantón Saquisilí, Provincia de Cotopaxi, bajo un sistema SUDS” elaborado y presentado por el señor Ing. Diego Fernando Pérez Moreno, para optar por el Título de cuarto nivel de Magíster en Hidráulica con Mención en Obras Hidráulicas; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación, el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.



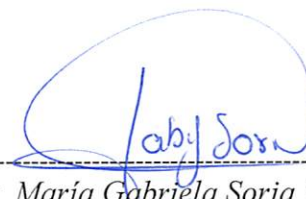
Ing. Santiago Paul Cabrera Anda Mg.

**Presidente y Miembro del
Tribunal**



Ing. Lenin Rafael Maldonado Narváez Mg.

Miembro del Tribunal

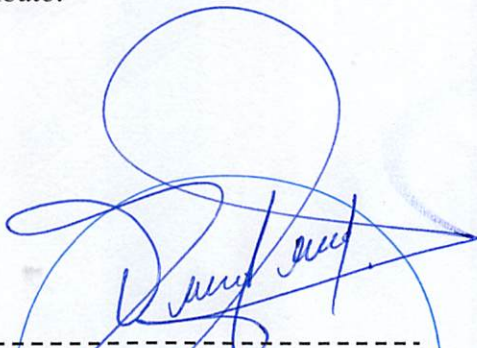


Ing. María Gabriela Soria Pugo Mg.

Miembro del Tribunal

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

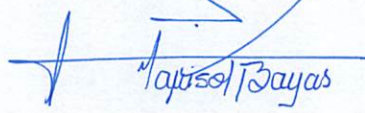
La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: “Diseño de un sistema de riego, para implementarse en el Parque Ecológico Cachipamba, ubicado en el sector La Matriz del cantón Saquisilí, Provincia de Cotopaxi, bajo un sistema SUDS”, le corresponde exclusivamente a: Ing. Diego Fernando Pérez Moreno, Autor bajo la Dirección de Ing. Myriam Marisol Bayas Altamirano Mg., Directora del Trabajo de Titulación, y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.



Ing. Diego Fernando Pérez Moreno

C.C.: 1803751856

AUTOR



Ing. Myriam Marisol Bayas Altamirano Mg.

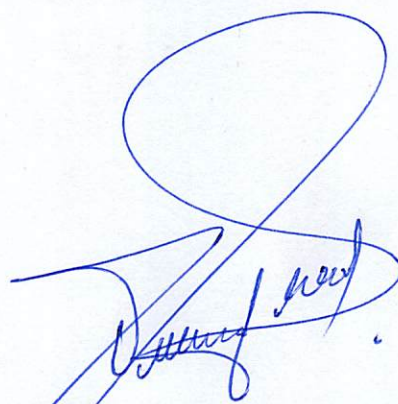
C.C.: 1802939205

DIRECTORA

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.



Ing. Diego Fernando Pérez Moreno

c.c.: 1803751856

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme una nueva oportunidad y ser mi paz en medio de la tormenta, a mi amada esposa por sus consejos y apoyo, a mis hijos que son el motor para esforzarme cada día más, a mis padres por todo el sacrificio que han hecho por mí, sus oraciones se ven reflejadas cada día.

A mis docentes, que han dejado una marca indeleble en mi preparación con su dedicación, conocimiento y ejemplo. Gracias por sus enseñanzas porque este logro profesional se ve reflejado en cada palabra impartida.

Con respeto y cariño,

Diego

DEDICATORIA

Dedico este logro a Dios por ser luz en mí caminar, a mi esposa, por ser mi ayuda idónea y amiga incondicional, a mis hijos Mikaela y Matías por ser la alegría de mi hogar, a mis padres por su amor, esfuerzo y ejemplo, por alentarme a seguir estudiando.

A mis docentes, por su dedicación y esfuerzo, gracias por todas sus palabras que permanecerán conmigo para siempre y porque me ayudaron a alcanzar esta meta.

Este logro representa todo lo maravilloso que he obtenido de cada uno de ustedes.

Con todo mi agradecimiento,

Diego

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PORTADA.....	i
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
RESUMEN EJECUTIVO	x
ABSTRACT.....	xi
Introducción	1
Justificación	2
Objetivos	2
Métodos materiales	2
Análisis de Resultados	5
Discusión.....	20
Conclusiones	21
Recomendaciones	22
Bibliografía	22

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de diseño precipitaciones	5
Tabla 2. Estadísticas de la regresión	7
Tabla 3. Diseño alcorque inundable.....	10
Tabla 4. Cálculos alcorque inundable	11
Tabla 5. Diseño final alcorque inundable	12
Tabla 6. Diseño tanques de almacenamiento	12
Tabla 7. Cálculos tanques de almacenamiento	13
Tabla 8. Diseño final tanques de almacenamiento.....	14
Tabla 9. Diseño zanja de infiltración	14
Tabla 10. Cálculo zanja de infiltración	15
Tabla 11. Diseño final zanja de infiltración.....	16
Tabla 12. Datos del suelo para el sistema de riego por goteo	16
Tabla 13. Datos de riego para el diseño del sistema	17
Tabla 14. Datos ambientales	17
Tabla 15. Resultados diseño del sistema de riego por goteo	18
Tabla 16. Diseño sistema de riego por aspersión.....	20

ÍNDICE DE TABLAS

Figura 1. Histórico precipitaciones	4
Figura 2. Frecuencias relativas y esperadas para las precipitaciones durante el periodo de estudio	5
Figura 3. Precipitaciones máximas durante el periodo de estudio.....	6
Figura 4. Curva de intensidad – duración – frecuencia de las precipitaciones	8
Figura 5. Hietograma de precipitación de diseño	9

RESUMEN EJECUTIVO

Vinculado a las fuentes municipales de agua, el Parque Ecológico Cachipamba sufre la falta de gestión del agua debido al cambio climático. El objetivo de este estudio es proponer un sistema de riego por goteo integrado con Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) para utilizar el agua de manera óptima, reducir la cantidad de escorrentía y mejorar la resiliencia al cambio climático con cierto modelo de estudio de caso para un espacio verde urbano en una zona semiárida. Métodos: El enfoque utilizado en esta tesis fue mixto, incluyendo: (1) análisis de las series hidrológicas disponibles (1976-2017) para determinar las precipitaciones máximas y los periodos de retorno; (2) modelización hidráulica del sistema de riego con un caudal de 45,89 m³/h (90% de eficiencia); (3) diseño de un SUDS que tuviera capacidad para eventos extremos (180 mm/h) y; (4) evaluación social, realizada a través de talleres con miembros de la comunidad local y mediante entrevista con expertos de la comunidad. Resultados: El sistema demostró: (a) ahorrar un 36,03% de agua potable con la recogida de aguas pluviales; (b) una gestión eficaz de las tormentas para un periodo de retorno de 100 años; (c) realizar la lámina de riego en 16,67 mm cada tres días. La infraestructura SUDS demostró ser capaz de infiltrar el 40% de la escorrentía y mejorar la calidad del agua (85% de eliminación de sólidos). Discusión y conclusiones: Los resultados confirman el éxito de los sistemas integrados para la gestión sostenible del agua en zonas urbanas. Aunque es necesario un seguimiento continuo para observar y mantener los parámetros biológicos, el diseño supera a las alternativas convencionales en adaptabilidad climática y eficiencia. En futuras investigaciones habrá que estudiar las repercusiones a largo plazo sobre la biodiversidad, así como su replicabilidad en otros contextos urbanos.

DESCRIPTORES: *RIEGO SOSTENIBLE, SUDS, GESTIÓN HÍDRICA URBANA, CAMBIO CLIMÁTICO, PARTICIPACIÓN COMUNITARIA.*

ABSTRACT

Linked to municipal water sources, the Cachipamba Ecological Park suffers from lack of water management due to climate change. The objective of this study is to propose a drip irrigation system integrated with Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) to optimally use water, reduce the amount of runoff and improve resilience to climate change with a certain case study model for an urban green space in a semi-arid area. **Methods:** The approach used in this thesis was mixed, including: (1) analysis of available hydrological series (1976-2017) to determine maximum rainfall and return periods; (2) hydraulic modeling of the irrigation system with a flow rate of 45.89 m³/h (90% efficiency); (3) design of a SUDS that had capacity for extreme events (180 mm/h) and; (4) social assessment, conducted through workshops with local community members and by interviewing community experts. **Results:** The system demonstrated: (a) 36.03% potable water savings with rainwater harvesting; (b) effective storm management for a 100-year return period; (c) irrigation coverage of 16.67 mm every three days. The SUDS infrastructure proved to be able to infiltrate 40% of the runoff and improve water quality (85% solids removal). **Discussion and conclusions:** The results confirm the success of integrated systems for sustainable water management in urban areas. Although continuous monitoring is necessary to observe and maintain biological parameters, the design outperforms conventional alternatives in terms of climate adaptability and efficiency. Future research will need to study the long-term impacts on biodiversity, as well as its replicability in other urban contexts.

KEYWORDS: *SUSTAINABLE IRRIGATION, SUDS, URBAN WATER MANAGEMENT, CLIMATE CHANGE, COMMUNITY PARTICIPATION.*

Introducción

Un pulmón verde y área recreativa importante para la comunidad es el Parque Ecológico Cachipamba, ubicado en el cantón Saquisilí, provincia de Cotopaxi. Sin embargo, su eficiente gestión del agua está suponiendo un reto para su desarrollo sostenible y como área de conservación [1]. El cambio climático y el aumento de la demanda están transformando la región en un país con escasez de agua [2]. Como muchas áreas verdes urbanas, el parque depende del suministro municipal de agua potable para el riego de su área verde y el mantenimiento de sus instalaciones [3, 4]. Además, esta dependencia es cara e impone una presión sobre los recursos hídricos locales [5]. Estudios previos han demostrado cómo los SUDS pueden ser eficaces en entornos urbanos y periurbanos [6, 7]. Además de resolver los problemas particulares del parque, este proyecto pretende ser un modelo para el uso sostenible del agua en otros espacios verdes urbanos y periurbanos de la región [8].

Antes de hablar específicamente de sistemas de regadío sostenibles, hay que entender la noción de desarrollo sostenible. A modo de ejemplo, en 1983 la Comisión de Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas (UNED) redactó la publicación "Nuestro futuro común", o Informe Brundtland, en 1987. Este informe propuso por primera vez el concepto de desarrollo sostenible [9]. Como se indica en dicho documento, el desarrollo sostenible es aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades [10, 11].

Desde la década de 1960, varios países europeos industrializados y Estados Unidos han invertido para aprender, crear y utilizar esos métodos de recogida, tratamiento y aprovechamiento de las precipitaciones [12]. Gracias a estas innovaciones, el agua de lluvia ha mejorado hasta convertirse en un valioso recurso de agua dulce. Por otra parte, desde la década de 1970 se ha propuesto un método alternativo para hacer frente a estos problemas, basado en el creciente conocimiento de varias naciones de Asia, Oceanía y Europa [13]. La implementación de los SUDS mejora dos objetivos de gestión de aguas torrenciales. La recarga del acuífero, la transmisión de flujo, la entrega de descargas controlada/regulada, la reducción del pico de las inundaciones y el control de las fuentes son algunos de los métodos utilizados

para redistribuir las corrientes urbanas [14, 15]. El segundo objetivo es reducir el impacto negativo sobre las fuentes de agua causado por las corrientes urbanas.

Justificación

Este trabajo se basa en la teoría de la hidrología urbana y la gestión integrada de los recursos hídricos, que hace hincapié en la necesidad de resolver los problemas del agua en las regiones urbanas de forma sostenible y eficaz [16]. La incorporación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) está en consonancia con estas teorías porque apoyan enfoques basados en la naturaleza que imitan las prácticas hidrológicas naturales para mejorar la gestión de las aguas pluviales, minimizar la escorrentía y potenciar la infiltración. En lo referente al aspecto metodológico, la metodología propuesta combina enfoques cuantitativos y cualitativos para lograr un diseño integral y efectivo.

Objetivos

- Investigar y seleccionar las tecnologías SUDS más adecuadas para el Parque Ecológico Cachipamba, considerando las características del sitio, el clima local y los objetivos de sostenibilidad
- Diseñar un sistema de captación y almacenamiento de aguas pluviales que sea eficiente, sostenible y se integre armoniosamente con el paisaje del Parque Ecológico Cachipamba, del cantón Saquisilí
- Diseñar un sistema de riego eficiente y adaptable para el Parque Ecológico Cachipamba

Métodos materiales

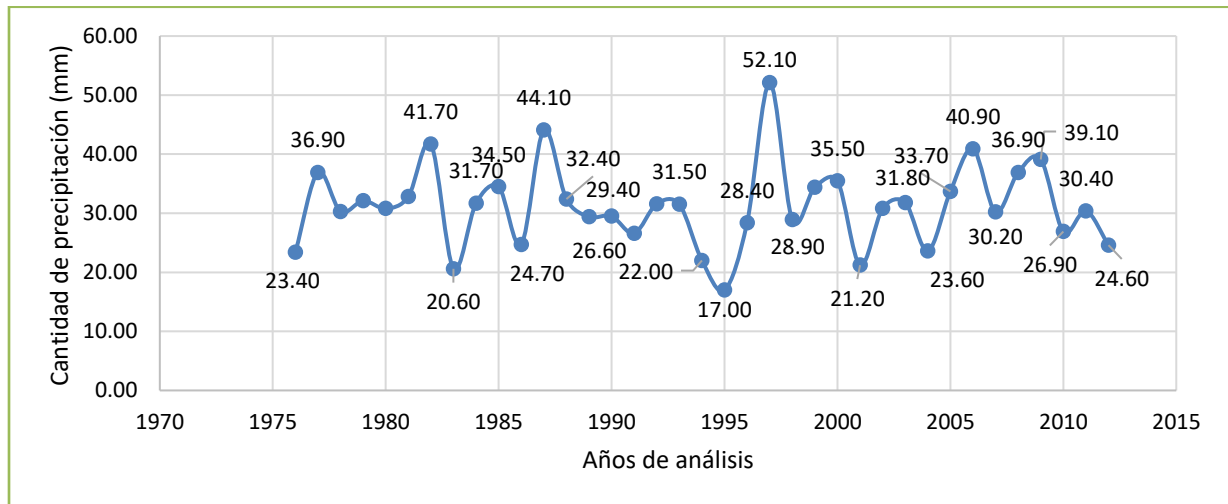
Para el correcto desarrollo del presente trabajo de investigación se optó por el empleo de un enfoque mixto. Este tipo de enfoque combina los mejores aspectos de los enfoques cuantitativos y cualitativos, permitiendo así la realización de un exhaustivo de los aspectos técnicos e hidráulicos del diseño. En lo que respecta al enfoque cuantitativo, este se considera fundamental en el diseño técnico del sistema de riego y los componentes de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).

Para el desarrollo de la investigación se han utilizado los siguientes procesos.

- **Análisis hidrológico:** Se realizó un examen histórico de los datos pluviométricos combinado con mediciones de caudal y escorrentía [17]. El estudio permitió a los investigadores determinar las cantidades de agua de lluvia reutilizable que podrían sustentar el sistema de riego.
- **Modelización hidráulica:** Las herramientas de simulación de datos modelaron cómo se comportaba el agua dentro del terreno mediante simulaciones hidráulicas [18]. Los diseñadores determinaron el tamaño de los componentes del sistema de riego, que resultó adecuado para el entorno del parque.
- **Cálculos de eficiencia hídrica:** La eficiencia hídrica del sistema de riego se evaluó cuantitativamente mediante cálculos que rastreaban tanto la eficiencia de la recogida de agua de lluvia como la disminución de la dependencia del agua potable.
- **Implementación de los SUDS seleccionados para el estudio:** Se implementaron SUDS relacionados con las necesidades del parque. Para el estudio, los SUDS seleccionados fueron el alcorque inundable, tanques de almacenamiento y una zanja de infiltración.

El enfoque cualitativo aportó información adicional a los resultados de las herramientas cuantitativas en los ámbitos social y medioambiental. Estos métodos de evaluación aportaron percepciones detalladas sobre cómo interactúa el sistema de riego en su entorno medioambiental, así como sobre la aceptación por parte de la comunidad. En primera instancia se realizó una caracterización de los patrones históricos de precipitación presentes en la zona de estudio. Se tomó en consideración el periodo comprendido entre 1976 y 2017, con la finalidad de conocer el comportamiento de dicha zona.

Figura 1. Histórico precipitaciones



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del estudio

En lo que respecta al periodo de retorno (T), representa el intervalo promedio (en años) entre eventos de precipitación extrema. El período de retorno (T) es un concepto estadístico que describe la probabilidad de que un evento, como una lluvia intensa, ocurra en un año específico. Se utiliza para estimar la frecuencia de eventos extremos (como tormentas severas o inundaciones). Este se calcula de la siguiente manera:

$$T = \frac{1}{p}$$

Por otra parte, la probabilidad de excedencia se calculó de la siguiente manera:

$$P = \frac{m}{n + 1}$$

A modo de resumen, en la siguiente tabla se presentan los parámetros estadísticos que se emplean para el análisis de las precipitaciones.

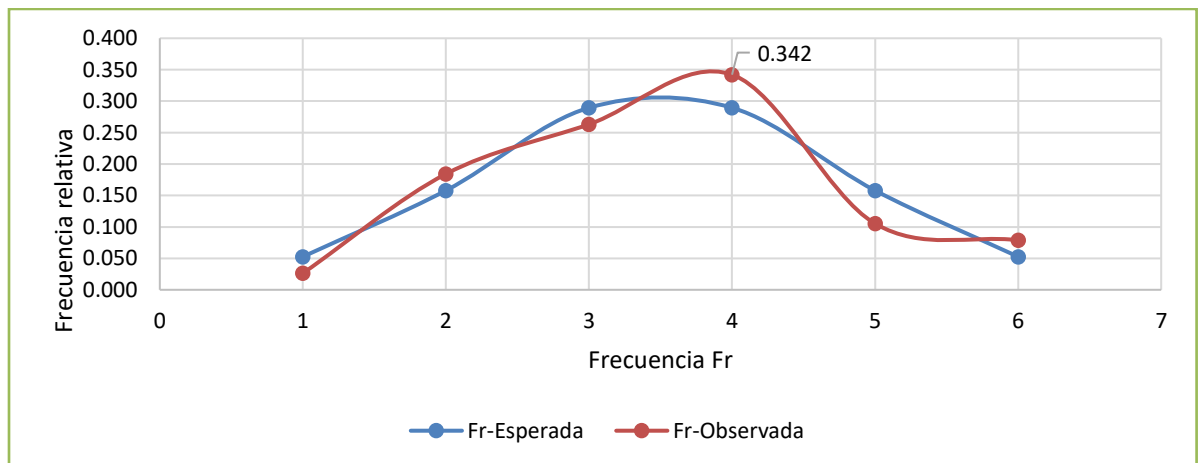
Tabla 1. Parámetros de diseño precipitaciones

Parámetros Estadísticos	P24hr
Media	34,9195
Varianza	73,7804
Desviación Estándar	8,5896
Coefficiente de varianza	0,2460
Coefficiente Sesgo	0,1985
Coefficiente Curtosis	2,8987

Análisis de Resultados

En primera instancia, se procede a calcular los niveles de precipitación máxima empleados para el estudio.

Figura 2. Frecuencias relativas y esperadas para las precipitaciones durante el periodo de estudio

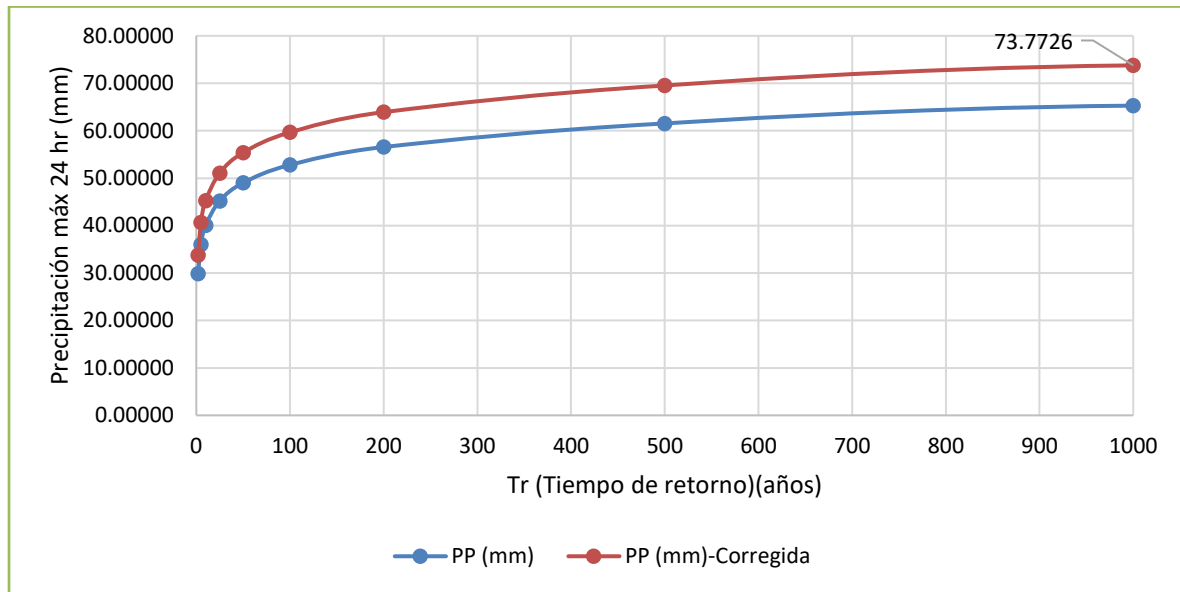


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del estudio

El valor pico de 0.342 en las frecuencias observadas para rangos altos de precipitación, se

traduce en que dicho valor es el más esperado durante la presencia de lluvia. Este valor, entonces, debe ser el de mayor importancia y consideración dentro de los cálculos que se realizan para el diseño de los SUDS seleccionados

Figura 3. Precipitaciones máximas durante el periodo de estudio



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del estudio

En lo que respecta a las precipitaciones máximas esperadas durante los siguientes años, se puede apreciar un crecimiento entre los 30 y 73 mm al final del periodo de estudio. La organización Meteorológica Mundial, en su guía de prácticas hidrológicas, explica que estudios de miles de años - estaciones de datos pluviométricos indican que al multiplicar las cantidades máximas anuales de lluvia diaria u horaria, para un solo intervalo fijo de observaciones de una a 24 horas por el factor 1.13.

Se puede apreciar que los valores entre la precipitación probable y su valor corregido varía en aproximadamente en un intervalo de 4 a 10 mm. Estos valores se toman en consideración para el diseño final del sistema seleccionado para el parque. Posterior a ello, se procedió a realizar las curvas de intensidad – duración y frecuencia, tomando en consideración a la siguiente expresión para el cálculo.

$$I = \frac{P_D}{D}$$

Donde:

PD: Precipitación máxima de duración (mm)

D: Duración de la precipitación (h)

Es importante mencionar también que los datos necesarios para el gráfico de las curvas IDF se consiguieron a través de una regresión múltiple. El modelo empleado se presenta con la siguiente expresión.

$$I_{max} = \frac{K x T^m}{D^n}$$

Donde:

I_{max}: Intensidad máxima de lluvia

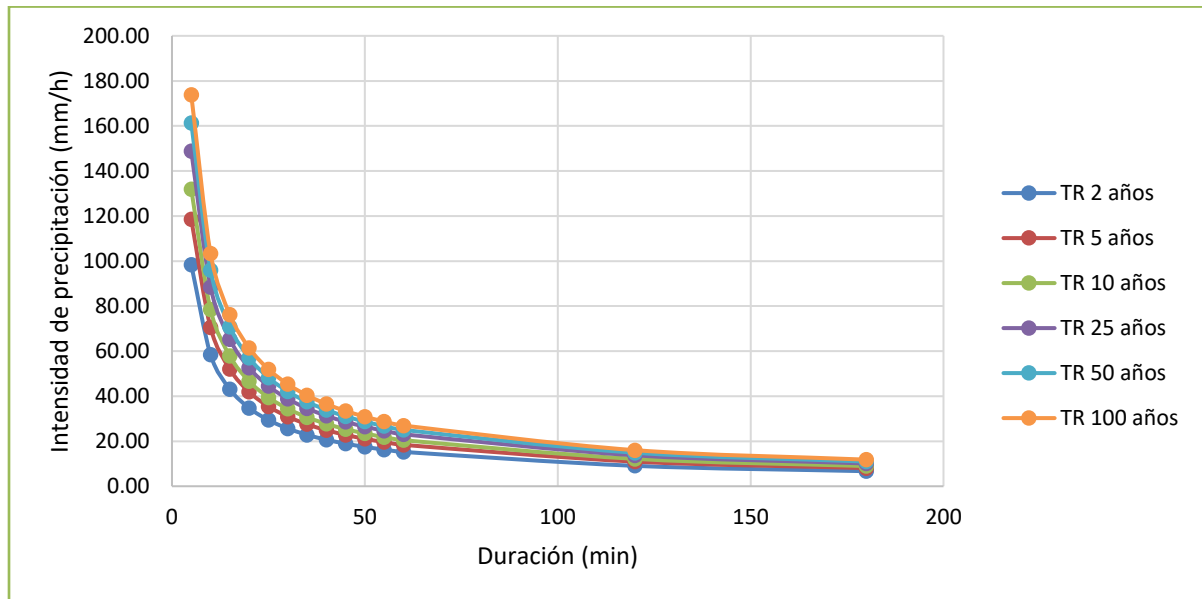
T: Periodo de retorno

D: Duración de la precipitación, en minutos

Tabla 2. Estadísticas de la regresión

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,99946607
Coefficiente de determinación R ²	0,998932425
R ² ajustado	0,998925581
Error típico	0,018254141
Observaciones	315

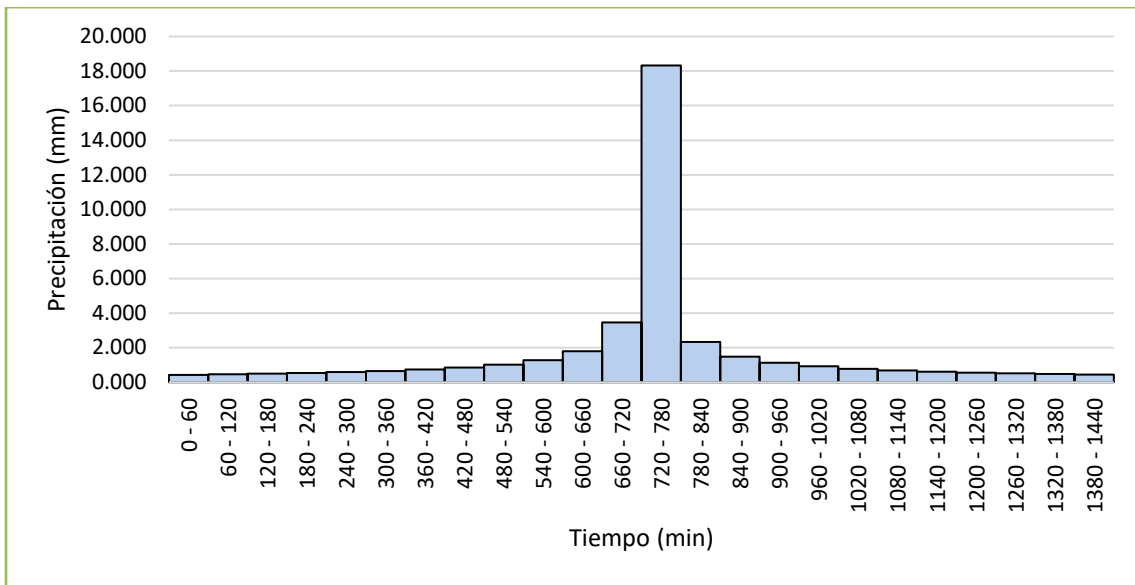
Figura 4. Curva de intensidad – duración – frecuencia de las precipitaciones



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del estudio

La intensidad máxima se registra en eventos de corta duración, las curvas muestran una tendencia decreciente significativa, alcanzando valores particularmente elevados. La intensidad máxima asciende a unos 180 mm/h y se registra en tormentas que superan ligeramente los 40 minutos y tienen un periodo de retorno de 100 años. En los primeros 50 minutos. Sin embargo, a partir de los 100 minutos, las curvas se estabilizan y la intensidad disminuye más lentamente a medida que aumenta la duración del suceso. Es importante mencionar que, al no haber una norma en el país para el cálculo de los parámetros de las curvas IDF, se optó por emplear un modelo realizado en Bogotá, dada la cercanía del país y las condiciones de su aplicación. Estos resultados son fundamentales para el diseño final del sistema SUDS. La necesaria incorporación de estructuras de captación rápidas y una conducción eficiente es exigida por las intensidades extremas encontradas para tormentas cortas pero intensas (especialmente para aquellas con largos periodos de retorno). Las curvas anteriores se complementan mediante el análisis exhaustivo de las mismas, y corroboran la necesidad de un sistema SUDS multifuncional y adaptable.

Figura 5. Hietograma de precipitación de diseño



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del estudio

El hietograma demuestra un régimen de precipitación variable, con las mayores acumulaciones durante el periodo de 720 a 780 minutos. Sin embargo, los periodos de precipitaciones ligeras o intermitentes se identifican por intervalos entre 180 y 240 minutos y 900 y 960 minutos, en los que parece haber precipitaciones sustancialmente menores (menos de 4,000 mm). Con base en estos datos, se procede a diseñar el sistema SUDS para el parque. A continuación, se presentan los cálculos desarrollados para cada uno de los tipos de SUDS empleados para el presente estudio, tomando en consideración todos los aspectos analizados previamente.

Tabla 3. Diseño alcorque inundable

Diseño de alcorque inundable						
Item	Parámetro	Valor	Unidad	Simbología	Observación	Ecuación
DATOS	Profundidad del sustrato	0,65	m	d_m	Valor recomendado mínimo de 0.60 m y 0.10 m bajo el capellón	
	Tiempo del vaciado del filtro	12,00	h	T_d	Se recomienda un valor de 12 horas	
	Permeabilidad del sustrato	70,00	mm/h	k	Valor típico es 70 mm/h	
	Porosidad efectiva del sustrato	40,00	%	n_m	Valor típico 40%	
	Porosidad efectiva del sustrato	40,00	%	n_g	Típicamente se asume como 40%	
	Área superficial de la parte superior del sustrato	2,56	m ²	A_{sm}		
	Área superficial de la parte más baja del área del encharcamiento	2,56	m ²	A_s		
	Área superficial a la máxima profundidad del encharcamiento	2,56	m ²	A_f		
	Máxima profundidad de encharcamiento	0,15	m	d	Debe estar entre 15 y 30 cm	
	Diámetro de tubería perforada	0,10	m	D_s	El diámetro de la tubería usualmente se encuentra entre 0.10 y 0.15 m	
	Profundidad de la capa de grava	0,10	m	d_t		
	Profundidad de la capa de drenaje sobre la tubería	0,15	m	d_{cg}	Se recomienda un valor de 15 cm	
	Profundidad de la capa de drenaje bajo la tubería	0,15	m	d_{as}	Se recomienda un valor mínimo de 8 cm	
	Tasa de infiltración del suelo	94,50	mm/h	f	Tasa de infiltración según estudios geotécnicos (mm/h)	
	Profundidad de capa de drenaje	0,40	m	d_c		$d_c = d_{cg} + d_{as} + D_s$
	Coeficiente de escorrentía	0,90		C	Coeficiente de escorrentía	
	Profundidad de lluvia	18,32	mm	hp	Profundidad de lluvia (Método bloques alternos)	
	Área tributaria	1000,00	m ²	Ad	Área tributaria del alcorque inundable	

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del estudio

El sustrato tiene una profundidad de 0,65 m (por encima del mínimo de 0,60 m), una permeabilidad de 70 mm/h y una porosidad del 40%. La zanja mantiene una superficie constante de 2,56 m² y una profundidad de encharcamiento de hasta 0,15 m (en el rango de 15-30 cm). El diseño incorpora tubos perforados de 0,10 m de diámetro con capas de grava (0,10

m) y drenaje (0,15 m). El cálculo de la intensidad en mm se realiza de acuerdo a la normativa, tomando un periodo de retorno de 5 años y una duración de la precipitación t de 60 minutos, esto de acuerdo al método de bloque alterno.

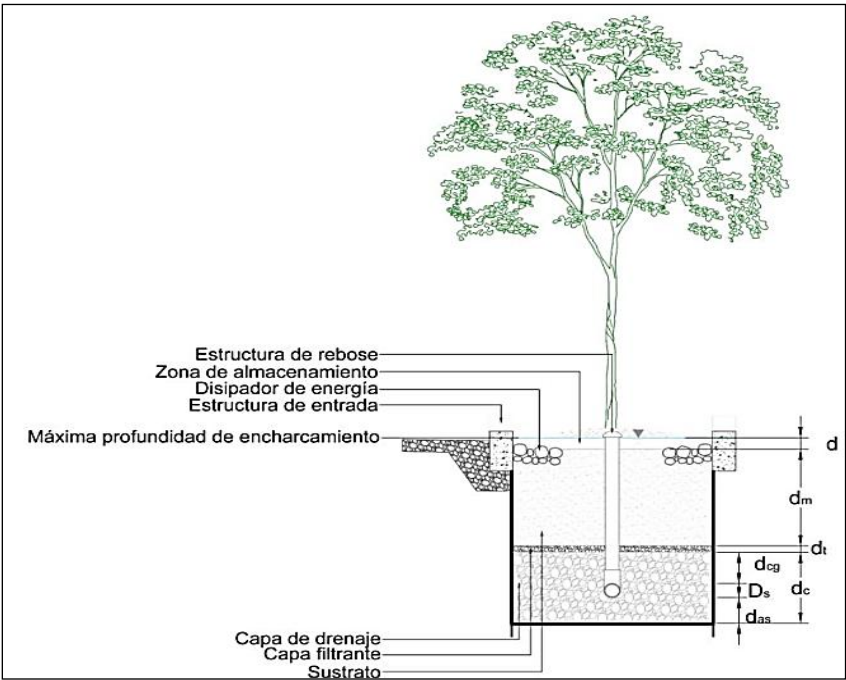
Tabla 4. Cálculos alcorque inundable

CÁLCULOS	Volumen de diseño	16,49	m ³	Vc	Volumen de calidad	$V_c = C \cdot h_p \cdot A_d$
	Volumen tratado	1,46	m ³	V	$V = A_{sm} \cdot (d_m \cdot n_m + d_c \cdot n_g) + \frac{A_f + A_s}{2} \cdot d + V_{pt}$	
	Volumen infiltrado	0,15	m ³	V _{inf}	$V_{inf} = A_{sm} \cdot \text{Mínimo} \left(d_{as} \cdot n_g; \frac{1}{2} \cdot f \cdot 0.024 \right)$	
	Volumen infiltrado (Cuando no incluye drenaje)	1,46	m ³	V _{inf}	$V_{inf} = \text{Mínimo} \left(V; A_{sm} \cdot f \cdot \frac{1}{2} \cdot 0.024 \right)$	
	Volumen filtrado	1,31	m ³	V _f		$V_f = V - V_{inf}$
	Volumen de encharcamiento	0,38	m ³	V _{en}	V _{pt} = Volumen almacenado en prácticas de pretratamiento	$V_{en} = \frac{A_f + A_s}{2} \cdot d + V_{pt}$

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del estudio

Otros cálculos son el volumen tratado (V), que tiene en cuenta las superficies y profundidades de las capas del sistema; el volumen infiltrado (Vinf), calculado a partir de la velocidad de infiltración del suelo (94,50 mm/h) y las características granulares, y el volumen filtrado (Vj), es decir, la diferencia entre el volumen total y el volumen infiltrado. Los cálculos tienen en cuenta los dos tipos de casos con sistemas de drenaje interno y aquellos en los que la infiltración es la vía dominante, lo que permite operar con temperaturas por debajo o por encima de la media. El volumen de diseño del alcorque inundable tiene una capacidad de 16,49 m³, con un volumen de filtrado de 1,31 m³.

Tabla 5. Diseño final alcorque inundable



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del estudio

Con base en los cálculos indicados en las tablas 3 y 4, se procede a diseñar el alcorque inundable, tomando en consideración las medidas mostradas en la tabla 5. Se procede entonces a diseñar los tanques de almacenamiento.

Tabla 6. Diseño tanques de almacenamiento

Diseño tanques de almacenamiento						
Item	Parámetro	Valor	Unidad	Simbología	Observación	Ecuación
DATOS	Área de la proyección horizontal de la cubierta	500,00	m ²	S_{ph}	Área de la proyección horizontal de la cubierta	
	Valor de lluvia de diseño	18,32	mm	h_p	Se calcula de las curvas IDF	
	Factor de seguridad	0,0012	m/mm	F_s	Se recomienda usar un valor mínimo de 1.2×10^{-3} (m/mm)	
	Diámetro del orificio	0,20	m	D		

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del estudio

El área de proyección horizontal de la cubierta se establece en 500 m² (*St_h*), la cual determina la capacidad de captación de agua pluvial. La lluvia de diseño (*h_p*) es de 18.32 mm, valor obtenido de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para garantizar que el sistema maneje eventos de precipitación representativos. Se incluye un factor de seguridad (*F_s*) de 0.0012 m/mm, cumpliendo con la recomendación mínima de 1.2×10^{-3} m/mm para asegurar la estabilidad y funcionalidad del tanque ante variaciones climáticas. Además, se especifica un diámetro crítico (*D*) de 0.20 m para los componentes de conducción, optimizando el flujo y almacenamiento del agua captada.

Tabla 7. Cálculos tanques de almacenamiento

CÁLCULOS	Volumen del tanque de almacenamiento requerido	10,99	m ³	V_{tanque}		$V_{\text{tanque}} = S_{ph} \times h_p \times F_s$
	Coefficiente adimensional	0,60		C_d	Se recomienda un valor de 0.60	
	Área del tanque		m ²	A_{tanque}	Superficie de la sección transversal del tanque de almacenamiento	
	Distancia vertical	2,00	m	h_0	Distancia vertical desde el punto central del tubo de vaciado hasta la parte inferior del rebose	
	Altura final del agua tras vaciado	0,30	m	h_f	Altura final del agua tras vaciado medida desde el punto central del tubo de vaciado (habitualmente 0 m)	
	Gravedad	9,80	m/s ²	g	Valor de gravedad 9.81 m/s ²	
	Tiempo de concentración	120,00	s	t		
	Área del orificio de salida del tubo de vaciado pasivo	0,03	m ²	A_o		$A_o = \frac{2 \times A_{\text{tanque}} \times [h_0^{1/2} - h_f^{1/2}]}{C_d \times t \times [2 \times g]^{1/2}}$

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del estudio

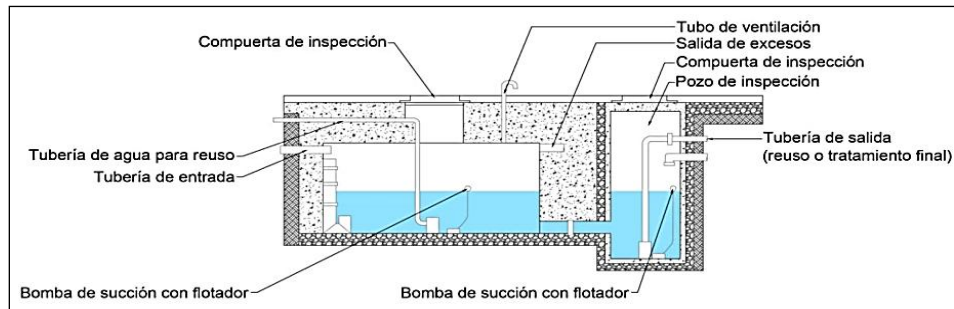
El diseño hidráulico detallado incluye:

- El cálculo del área del orificio de salida ($A_o = 0.03 \text{ m}^2$) mediante una ecuación que considera el área del tanque (A_{tanque}), las alturas de agua inicial (h_0) y final ($h_f = 0 \text{ m}$), el coeficiente de descarga (C_d), el tiempo de concentración (t) y la gravedad ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$).
- Un sistema de vaciado pasivo que regula el flujo en función de la altura del agua, optimizando el tiempo de vaciado sin requerir energía externa.
- Parámetros geométricos como la distancia vertical (h_0) desde el tubo de vaciado hasta

el rebose, que junto con la sección transversal del tanque (Atanque) determinan la curva de operación del sistema.

Con base en los resultados generados por los cálculos efectuados en las tablas 6 y 7, se procede a diseñar el tanque, tomando en consideración las dimensiones mostradas en la tabla 8.

Tabla 8. Diseño final tanques de almacenamiento



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del estudio

En la figura anterior se observan todas las dimensiones necesarias para el diseño del tanque. Se resalta la presencia de todos los elementos. El siguiente elemento a diseñar es la zanja de infiltración.

Tabla 9. Diseño zanja de infiltración

Diseño de zanja de infiltración						
Item	Parámetro	Valor	Unidad	Simbología	Observación	Ecuación
DATOS	Tasa de infiltración	316,00	mm/h	f	Tasa de infiltración según estudios geotécnicos (mm/h)	
	Factor de seguridad	0,50		FS _a	Se recomienda utilizar un valor cercano a 0.5	
	Tiempo de drenaje	48,00	h	Td		
	Porosidad del reservorio	40,00	%	ng	Porosidad del material agregado (%)	
	Profundidad final de la zanja	1,00	m	d		
	Coefficiente de escorrentía	0,90		C	Coefficiente de escorrentía	
	Profundidad de lluvia	18,32	mm	hp	Profundidad de lluvia (Método bloques alternos)	
	Área tributaria	2000,00	m ²	Ad	Área que aporta escorrentía a los alcorques inundables	
	Volumen de diseño	32,98	m ³	Vc	Volumen de calidad	$Vc = C \cdot hp \cdot Ad$

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del estudio

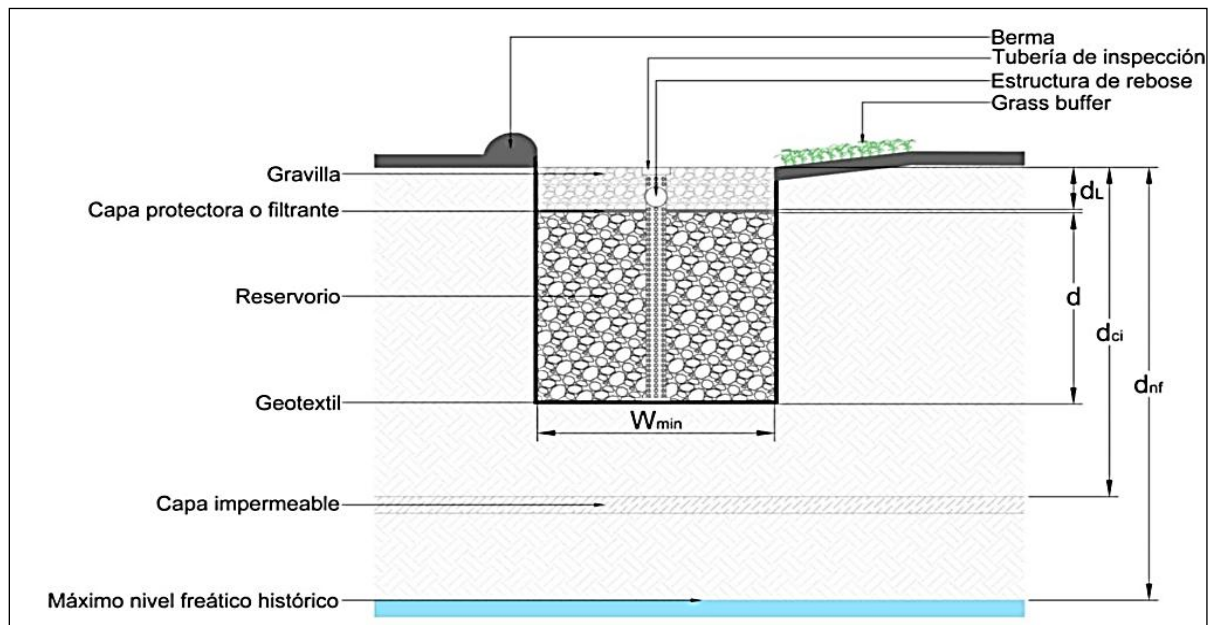
El diseño técnico de la zanja de infiltración introduce parámetros para la entrega de eficacia hidrológica, mismos que se presentan en la tabla 9. La velocidad de infiltración del suelo se fija en 316 mm/h, valor derivado de estudios geotécnicos, por lo que la capacidad del sistema puede dimensionarse adecuadamente con respecto a la absorción. Se utiliza un factor de seguridad de 0,5 (FS₃) para tener en cuenta las posibles variaciones del estado del suelo, de acuerdo con la normativa técnica. Los parámetros geométricos incluyen una profundidad final de la zanja de 1,0 m (d) y una porosidad del material del depósito del 40% (n_g).

Tabla 10. Cálculo zanja de infiltración

CÁLCULOS	Tasa de infiltración de diseño	158,00	mm/h	f _d	f = Tasa de infiltración según estudios geotécnicos (mm/h) Fsa = Factor de seguridad	$f_d = f * FS_a$
	Profundidad máxima de la zanja	0,76	m	d _{máx}	Máxima profundidad del reservorio con material grueso	$d_{máx} = \frac{f_d}{1000} * T_{dmáx}$
	Área mínima de la zanja	82,44	m ²	A _{mín}	Área mínima de fondo de la zanja	$A_{fmin} = \frac{V_c}{d_{máx} * \frac{n_g}{100}}$
	Área de fondo	192,00	m ²	A _f	Lf = Largo de fondo (m) Wf = Ancho de fondo (m)	$A_f = L_f * W_f$
	Profundidad de diseño de zanja	0,43	m	d		$d = \frac{V_c}{A_f * \frac{n_g}{100}}$

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del estudio

Tabla 11. Diseño final zanja de infiltración



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del estudio

En base a lo mostrado en la tabla 10, se procedió a realizar el diseño de la zanja de infiltración. Esta tiene un área mínima de 82,44 m², con un área de fondo de 192 m² y una profundidad de diseño de zanja de 0,43 m. Una vez desarrollados los diferentes sistemas SUDS para el proyecto, se diseñó el sistema de riego por goteo tanto para la cancha como para las zonas verdes del parque. Se tomaron en consideración los datos de diseño presentados en las tablas 12, 13 y 14.

Tabla 12. Datos del suelo para el sistema de riego por goteo

Datos del suelo		
Tipo de suelo	Franco Arcilloso	
CC	22,90 %	%HG
PMP	11,90 %	%HG

Densidad	1,44	g/cm ³
Profundidad efectiva de raíz	400,00	mm
% Agotamiento (LARA)	36,03 %	

Como muestra la tabla 12, el parque cuenta con un suelo franco arcilloso, presentando una profundidad efectiva de raíz de 400 mm, con un porcentaje de agotamiento de 36,03%. Estos valores deben ser altamente considerados para el diseño del sistema de riego planteado.

Tabla 13. Datos de riego para el diseño del sistema

Datos del riego		
Espaciamiento laterales propuesto	1,50	m
Espaciamiento emisores propuesto	0,30	m
Caudal del gotero	1,05	l/h
Presión de operación	10,00	mca

El sistema de riego a diseñar debe tener la capacidad de generar un caudal de gotero de 1,05 l/h, tomando también en consideración una presión mínima de operación de 100 m.c.a. Estos parámetros se deben solventar únicamente con el agua de lluvia recolectada por los SUDS planteados previamente, generando así el ahorro de agua requerido para el estudio.

Tabla 14. Datos ambientales

Datos del ambiente		
Área	3,69	ha
Horas disponibles	16,00	
Demanda hídrica de diseño	5,00	mm/día

Eficiencia esperada	90,00 %	
Textura	pesados	

Con el diseño del sistema propuesto, se plantea tener una eficiencia cercana al 90%, tomando en consideración la demanda hídrica de diseño, misma que es de 5 mm/día para las precipitaciones. Con base en estos datos, la tabla 15 presenta los resultados empleados para la creación del sistema de riego por goteo planteado.

Tabla 15. Resultados diseño del sistema de riego por goteo

Lámina de llenada de suelo	46,25	mm
Lámina de reposición	16,67	mm
Referencia de humedad (sensores)	%HG	%HV
CC	22,90 %	33,0 %
Momento de riego	18,9 %	27,3 %
PMP	11,90 %	17,1 %
% PAR (porcentaje de área regada)	73,00 %	
Precipitación	2,33	mm/h
Demanda Hídrica Bruta	5,56	mm/día
Frecuencia de riego	3,00	días
Lámina riego corregida	16,67	mm/riego
Tiempo de riego	7,14	horas
# turnos /día	2,00	
Total de turnos	6,00	
Área por turno	0,62	ha/turno

Horas efectivas al día	14,29	horas
Caudal de bombeo	13,35	m3/h
Caudal por hectárea	23,33	m3/h-día

Los parámetros técnicos presentados en la tabla 15 ofrecen detalles sobre el comportamiento y rendimiento del sistema de riego por goteo creado para Parque Ecológico Cachipamba. Estos valores, derivados de análisis hidrológico y agronómico, permite evaluar el comportamiento del sistema desde el punto de vista del manejo de agua y sostenibilidad. El sistema está diseñado con una lámina de suelo de llenado de 46.25mm, que es la capacidad máxima de acumulación de agua en el perfil de raíz. La lámina de reposición asoma 16.67 mm, que resulta del agua necesaria para llevar el suelo desde su humedad actual (18.9% HG o 27.3% HV) a su capacidad de campo (22.9% HG o 33.0% HV). Estos valores reflejan un diseño acertado que tiene en cuenta las características físicas del suelo franco arcilloso, con densidad de 1.44 g/cm³ y profundidad efectiva de raíces de 400 mm, aludiendo a lo indicado en el artículo.

La demanda hídrica del sistema supera a la planteada en el diseño (5,56 mm/día), situación que permite validar el mismo. Posterior a ello, se realizó el diseño del sistema de riego por aspersión para la cancha del parque.

Tabla 16. Diseño sistema de riego por aspersión

Diseño de riego por aspersión						
Item	Parámetro	Valor	Unidad	Simbología	Observación	Ecuación
LÁMINA DE AGUA	Coefficiente de desarrollo del cultivo	2,00		Kc	Adimensional	
	Evapotranspiración del tanque evaporímetro	1,20	mm	Eto		
	Evapotranspiración del cultivo	2,40	mm	Etc		$ETc = Kc \times Eto$
	Eficiencia de riego	0,90		Ef	Adimensional	
	Lámina de agua	2,67	lt/m ²	LR		$LR = \frac{Etc}{Ef}$
	Área de riego	6460,00	m ²	A		
	Volumen	17226,67	lt	V	Capacidad diaria necesaria	$V = LR \times A$
	Capacidad necesaria del tanque reservorio (para un día)	17,23	m ³	CNR		$CNR = V \times \#días$

El sistema de riego por aspersión se ha dimensionado considerando parámetros agronómicos e hidrológicos clave para garantizar una eficiencia óptima. El cálculo parte de la evapotranspiración de referencia (Eto) de 1.20 mm, ajustada mediante un coeficiente de cultivo (Kc) de 2.00 para obtener una evapotranspiración del cultivo (ETc) de 2.40 mm/día. Este valor, combinado con una eficiencia de riego del 90% (Ef), determina una lámina de riego (LR) de 2.67 litros/m²/día. Este diseño técnico del sistema de riego por goteo se integra perfectamente con los componentes SUDS previamente analizados, formando un sistema completo de gestión hídrica sostenible para el Parque Ecológico Cachipamba.

Discusión

El análisis de los resultados obtenidos en este estudio aporta informaciones sumamente importantes que son merecedoras de una adecuada discusión, sobre todo en función del encaje con otros estudios precedentes y con los objetivos inaugural del proyecto. La integración de un sistema consolidado de riego por goteo, aspersión y SUDS en el Parque Ecológico Cachipamba tiene características innovadoras. Los datos sobre hidrología presentan una alta variabilidad en los modos de precipitación, con eventos anómalos que alcanzan más de 50 mm

en 24 horas. Este comportamiento se aleja sustancialmente de los promedios históricos regionales (34.92 mm de promedio) y pone de manifiesto la necesidad de sistemas innovadores [19][7].

La integración de tecnologías de monitoreo en tiempo real (sensores de humedad, pluviómetros automáticos) representa un avance significativo respecto a sistemas convencionales. Los datos generados permitirán ajustes dinámicos en el programa de riego, optimizando aún más el uso del recurso hídrico [20, 4]. Esta innovación técnica contrasta con los sistemas estáticos predominantes en la región y posiciona al proyecto como referente en gestión inteligente del agua.

Conclusiones

Se logró identificar y seleccionar las mejores tecnologías de SUDS para el Parque Ecológico Cachipamba, en función de las características del sitio y del clima local. Mediante el análisis hidrológico y la modelización hidráulica, se diseñó un sistema capaz de hacer frente a eventos extremos de precipitación (hasta 180 mm/h) y maximizar la infiltración de agua, y se realizó una demostración de su eficacia en la gestión sostenible de los recursos hídricos. Estos resultados corroboran la necesidad de adaptar las soluciones SUDS a los requisitos medioambientales particulares para lograr resultados óptimos.

Es importante mencionar también que se pudo verificar que el diseño de los SUDS empleados para el uso del agua de lluvia cumple con los parámetros de eficiencia planteados y encajaba perfectamente con el paisaje del parque. Este sistema disminuye la dependencia de las fuentes municipales al tiempo que aumenta la calidad del agua, al eliminar el 85% de todos los sólidos, creando así un modelo replicable para otros espacios verdes urbanos.

Basado en el sistema de riego por goteo diseñado para el parque tiene una alta eficiencia (90%) con una lámina de riego óptima de 16,67 mm por 3 días. La combinación de sensores de humedad y pluviómetros automáticos permitió modificar de forma sostenible la programación del riego, lo que optimizó el uso del agua y mantuvo unas condiciones óptimas para la vegetación. Este novedoso enfoque ofrece mejores resultados que los sistemas tradicionales en

términos de adaptabilidad climática y eficiencia, con una coherencia que debería convertirlo en candidato para su adopción en otros ámbitos que se enfrenten a retos paralelos.

Recomendaciones

Los estudios periódicos de actualización hidrológica y climática desempeñan un papel importante a la hora de modificar el diseño de los SUDS en respuesta a la evolución de las circunstancias medioambientales. Asimismo, es importante ofrecer formación técnica periódica a los trabajadores de mantenimiento para que aprecien plenamente el funcionamiento y el mantenimiento necesarios para la conservación sostenida de los parques.

La viabilidad permanente del sistema se apoya en la propuesta de un seguimiento persistente para examinar la calidad del agua y el grado de infiltración del agua en el suelo. En general, es necesario apoyar la participación ciudadana en la conservación de estas estructuras mediante programas de información que destaquen su importancia para el control sostenible del agua y la reducción de los daños causados por las inundaciones.

La adopción de sistemas de automatización y control remoto, junto con un control digital basado en sensores, puede reforzar la eficiencia hídrica y facilitar la gestión del agua. Además, es necesario planificar actividades de mantenimiento proactivo de los componentes del sistema para garantizar su durabilidad y eficacia en cualquier condición meteorológica.

Bibliografía

- [1] Sañudo, Luis, J. Roces, C. Allende, C. Rey y A. Menéndez, «Manual Técnico de Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) y su Implementación en el Municipio de Gijón,» Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo, Oviedo, 2024.
- [2] J. Saldaña, C. Salazar, J. Ruiz, S. Cruz y M. Lomeli, «Factibilidad técnica de la implementación de los suds para mitigación de inundaciones,» *International Journal of*

Professional Business Review, vol. 9, nº 12, 2024.

- [3] J. Gonzalez, C. Sánchez, Y. Medina y L. Campuzano, «Metodología para diseño de sistemas urbanos de drenajes sostenibles en vías urbanas,» *Revista Ciencia Y Construcción*, vol. 4, nº 1, pp. 66-78, 2023.
- [4] F. Canales, S. Zubelzu y L. Rodríguez, «Metodología para la evaluación de la eficiencia en el uso del agua en sistemas de riego de parques urbanos extensos,» *Ingeniería del agua*, vol. 25, nº 4, pp. 303-317, 2021.
- [5] UNESCO, «Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.andi.com.co/Uploads/Agua%20y%20Cambio%20Clim%C3%A1tico.pdf>. [Último acceso: 15 Junio 2024].
- [6] D. Jaramillo, W. Panchana, A. Cuimbicos y N. Escudero, «Sistema de riego inteligente para el mantenimiento de áreas verdes en una institución educativa,» *Revista Científica y Tecnológica UPSE (RCTU)*, vol. 10, nº 2, 2023.
- [7] L. Tarazona, C. Bonilla y J. Rojas, «Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS): una alternativa integral para el manejo de las aguas lluvias,» *Mundo Fesc*, vol. 11, nº 21, pp. 140-155, 2021.
- [8] M. Rico, S. Perales, P. Ferrans, J. Romero y E. Blancas, «Estrategia de implementación de SUDS a escala local empleando análisisGIS multicriterio. Aplicación práctica al municipio de Granollers(Barcelona),» VII Jornadas de Ingeniería del Agua, Barcelona, 2024.
- [9] N. Arnaud, J. Comas, L. Corominas, S. Busquets, J. Pueyo y M. Poch, «Una nueva metodología para modelar SUDS utilizando SWMM y Giswater: estudio de caso en

Montjuic - Girona/España,» VII Jornadas de Ingeniería del Agua., 2023.

- [10] C. Taco, O. López, G. Vistín y .. J. López, «Lluvia sólida como estrategia de desarrollo sostenible en el cantón Guaranda en Ecuador,» *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, vol. 27, nº 1, 2022.
- [11] M. Marcos y E. Sánchez, «Soluciones basadas en la naturaleza y sistemas urbanos de drenaje sostenible frente a las inundaciones en España,» de *Geografía: cambios, retos y adaptación: libro de actas. XVIII Congreso de la Asociación Española de Geografía*, Logroño, 2023.
- [12] P. Melgarejo, D. Núñez, P. Legua, V. Lidón, A. Conesa, A. Marhuenda y J. Martínez, «Nuevo sistema de riego con recuperación de agua y nutrientes,» de *V Congreso Nacional del Agua - Libro de Actas*, 2023.
- [13] R. Roblero y J. Flores, «Captación de agua de lluvia como alternativa para uso en agricultura urbana,» *Vivienda y Comunidades Sustentables*, nº 11, pp. 111-124, 2022.
- [14] D. Rodríguez y N. Esteban, «Los sistemas urbanos de drenaje sostenibles como alternativa holística para la conservación de los humedales urbanos de Neiva, Huila,» *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, vol. 16, 2023.
- [15] J. Higuera, E. Gutiérrez, J. Navarro, F. Sánchez y F. Lagos, «Diseño de sistema zona de bio-retención en el campus de la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Bogotá,» *Producción + Limpia*, vol. 17, nº 1, 2023.
- [16] D. Calzadilla, C. Hernández, M. Martín y I. Doménech, «Microplásticos en SUDS maduros: evaluación del almacenamiento en suelo y su vínculo con plásticos de mayor tamaño,» *Ingeniería Del Agua*, vol. 29, nº 1, pp. 44-56, 2025.

- [17] I. Rodríguez, B. Moreno, G. Martínez y A. Muñoz, «Diseño urbano sensible al agua, una apuesta por la sostenibilidad urbana de Granada,» *Alzada*, nº 125, pp. 68-82, 2024.
- [18] E. García, J. Rodríguez, I. Domenech, C. Hernández y J. Miguel, «Diseño de pavimentos permeables en España: situación actual y necesidades futuras,» *Ingeniería del agua*, vol. 26, nº 4, pp. 279-296, 2022.
- [19] G. Olivares, B. Russo, M. Martínez, E. Bladé y M. Sanz, «“SUDS-linear” to reduce flood risk considering Climate Change scenarios,» *Ingeniería del agua*, vol. 26, nº 2, pp. 77-90, 2022.
- [20] I. Castañeda, A. Martínez y M. Rómulo, «Antidesertización: sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) como gestión integral en la regulación y control de aguas de lluvias,» *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, vol. 11, nº 3, pp. 167-173, 2023.