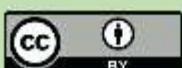




Esta obra está bajo una
[Licencia Creative Commons
Atribución - 4.0 Internacional \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)
Vea una copia de esta licencia en
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>





FACULTAD DE ECOLOGÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA

Tesis

Evaluación del proceso de infiltración mediante un sistema urbano de drenaje sostenible para el manejo de aguas de lluvia

Para optar el título profesional de Ingeniero Sanitario

Autor:

Noé Castro Marina

<https://orcid.org/0000-0002-3760-5156>

Asesor:

Ing. M.Sc. Alfonso Rojas Bardález

<https://orcid.org/0000-0001-9345-5474>

Moyobamba, Perú

2025



FACULTAD DE ECOLOGÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA

Tesis

Evaluación del proceso de infiltración mediante un sistema urbano de drenaje sostenible para el manejo de aguas de lluvia

Para optar el título profesional de Ingeniero Sanitario

Autor:
Noé Castro Marina

Sustentado y aprobado el 15 de octubre del 2025, ante el honorable jurado:



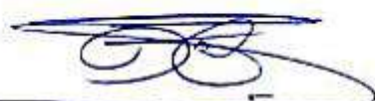
Presidente de Jurado
Ing. Dr. Andi Lozano Chung



Secretario de Jurado
Ing. M.Sc. Marcos Aquiles Ayala
Díaz



Vocal de Jurado
Lic. M.Sc. Ronald Julca
Urquiza



Asesor
Ing. M.Sc. Alfonso Rojas
Bardález

Moyobamba, Perú

2025



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
FACULTAD DE ECOLOGÍA
Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DEL INFORME FINAL DE TESIS CONDUCENTES A
TÍTULO PROFESIONAL N° 050-2025-UNSM/EPIS/UI**

Jurado reconocido con Resolución N° 078-2019-UNSM/CFT/FE, Moyobamba 25 de abril del 2019, modificado con Resolución N° 149-2025-UNSM/CFT/FE, Moyobamba 27 de marzo de 2025

FACULTAD DE ECOLOGÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA

PROGRAMA DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA SANITARIA

A las 12:00 horas, del día miércoles 15 de octubre de 2025, inició el acto público de sustentación del informe final de tesis “Evaluación del proceso de infiltración mediante un sistema urbano de drenaje sostenible para el manejo de aguas de lluvia” para optar el título profesional de Ingeniero Sanitario, presentado por **Noé Castro Marina** con la asesoría del **Ing. M.Sc. Alfonso Rojas Bardález**.

Instalada la Mesa Directiva conformada por el **Ing. Dr. Andi Lozano Chung** (Presidente del jurado), **Ing. M.Sc. Marcos Aquiles Ayala Díaz** (Secretario), **Lic. M.Sc. Ronald Julca Urquiza** (Vocal) y acompañado por el **Ing. M.Sc. Alfonso Rojas Bardález**, el presidente del jurado dirige brevemente unas palabras y a continuación el secretario dio lectura a la **Resolución N° 165-2019-UNSM/CFT/FE, de fecha 15 de julio del 2019**.

Seguidamente el autor expuso el informe final de tesis y el jurado realizó las preguntas pertinentes, respondida por el sustentante y eventualmente, con la venia del jurado, por el asesor.

Una vez terminada la ronda de preguntas el jurado procedió a deliberar para determinar la calificación final, para lo cual dispuso un receso de quince (15) minutos, con participación del asesor con voz, pero sin voto; sin la presencia del sustentante y otros participantes del acto público.

Luego de aplicar los criterios de calificación con estricta observancia del principio de objetividad y de acuerdo con los puntajes en escala vigesimal (de 0 a 20), según el Anexo 4.2 del RG-CTI, la nota de sustentación otorgada resultante del promedio aritmético de los calificativos emitidos por cada uno de los miembros del jurado fue... **Q. U. I. N. C. E. ... (15)**, tal como se deja constar en la siguiente descripción.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
FACULTAD DE ECOLOGÍA
Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria



De acuerdo con el Artículo 40º del RG-CTI, la nota obtenida es Aprobado y correspondiente a la calificación de Bueno. Leído este resultado en presencia de todos los participantes del acto de sustentación, el secretario dio lectura a las observaciones subsanables al informe final que el autor deberá corregir y alcanzar al jurado en un plazo máximo de treinta (30) días calendarios.

Se deja constancia que la presente acta se inscribe en el Libro de Sustentaciones N° 002 del Programa de Estudios de Ingeniería Sanitaria de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ecología de la UNSM.

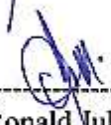
Firman los integrantes de la Mesa Directiva y el autor del informe final de tesis en señal de conformidad, dando por concluido el acto a las 13:55 horas, el mismo día miércoles 15 de octubre de 2025.




Ing. Dr. Asdi Lozano Chung
Presidente del Jurado



Ing. M.Sc. Marcos Aquiles Ayala Díaz
Secretario del Jurado



Lic. M.Sc. Ronald Julca Urquiza
Vocal del Jurado



Ing. M.Sc. Alfonso Rojas Bardález
Asesor



Noé Castro Marina
Autor

Declaratoria de autenticidad

Noé Castro Marina, con DNI N° 75702434, egresado de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria, Facultad de Ecología de la Universidad Nacional de San Martín, autor de la tesis titulada: **Evaluación del proceso de infiltración mediante un sistema urbano de drenaje sostenible para el manejo de aguas de lluvia.**

Declaro bajo juramento que:

1. La tesis presentada es de mi autoría.
2. La redacción fue realizada respetando las citas y referencia de las fuentes bibliográficas consultadas, siguiendo las normas APA actuales.
3. Toda información que contiene la tesis no ha sido plagiada.
4. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido alterados ni copiados, por tanto, la información de esta investigación debe considerarse como aporte a la realidad investigada.

Por lo antes mencionado, asumo bajo responsabilidad las consecuencias que deriven de mi accionar, sometiéndome a las leyes de nuestro país y normas vigentes de la Universidad Nacional de San Martín.

Moyobamba, 15 de octubre del 2025.


Noé Castro Marina
DNI N° 75702434



Ficha de identificación

Título: Evaluación del proceso de infiltración mediante un sistema urbano de drenaje sostenible para el manejo de aguas de lluvia	Área de investigación: Ciencia y Tecnología Ambiental Línea de investigación: Calidad Ambiental Sublínea de investigación: Contaminación de Agua Grupo de investigación: Calidad Ambiental (Resolución N° 183-2024-UNSM/CFT/FE) Tipo de investigación: Básica <input type="checkbox"/> , Aplicada <input checked="" type="checkbox"/> , Desarrollo experimental <input type="checkbox"/>
Autor: Noé Castro Marina	Facultad de Ecología Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria https://orcid.org/0000-0002-3760-5156
Asesor: Ing. M.Sc. Alfonso Rojas Bardález	Dependencia local de soporte: Facultad de Ecología Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria Unidad o Laboratorio Ingeniería Sanitaria https://orcid.org/0000-0001-9345-5474

Dedicatoria

Dedico el presente proyecto de tesis, en primer lugar, a Dios, por brindarme salud, fortaleza y sabiduría para culminar esta etapa tan importante de mi vida.

A mis padres, por su amor incondicional, apoyo constante y por ser mi mayor inspiración para seguir adelante. Gracias por cada sacrificio y cada palabra de aliento.

A mi familia, por su comprensión y compañía en cada momento del camino.

Finalmente, a mis docentes y asesores, por compartir sus conocimientos, orientación y paciencia, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a Dios, por brindarme vida, salud y fortaleza para culminar esta importante etapa académica.

Mi sincero agradecimiento a mis padres y familia, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación constante, los cuales fueron fundamentales durante todo este proceso.

Expreso mi profundo agradecimiento a mi asesor de tesis, por su valiosa orientación, paciencia y conocimientos compartidos, que permitieron el desarrollo adecuado del presente trabajo de investigación.

Asimismo, agradezco a los docentes de la universidad, quienes contribuyeron a mi formación profesional, y a todas las personas que, de manera directa o indirecta, colaboraron en la realización de este proyecto.

Finalmente, agradezco a mis compañeros y amigos por su apoyo moral y palabras de aliento en los momentos más desafiantes.

Índice general

Ficha de identificación.....	6
Dedicatoria.....	7
Agradecimientos	8
Índice general.....	9
Índice de tablas	12
Índice de figuras.....	13
RESUMEN	14
ABSTRACT	15
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN	16
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	19
2.1. Antecedentes de la investigación	19
2.1.1. Nivel internacional	19
2.1.2. Nivel nacional	20
2.1. Fundamentos teóricos.....	20
2.1.1. Ciclo hidrológico	20
2.1.2. Sistema urbano de drenaje sostenible.....	23
2.1.3. Sistemas de Infiltración.....	24
2.2.4. Términos básicos	28
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS	30
3.1. Ámbito y condiciones de la investigación.....	30
3.1.1. Contexto de la investigación.....	30
3.1.2. Periodo de ejecución	30
3.1.3. Autorizaciones y permisos.....	30
3.1.4. Control ambiental y protocolos de bioseguridad.....	31
3.1.5. Aplicación de principios éticos internacionales.....	31
3.2. Sistema de variables	31
3.2.1. Variables principales	31

	10
3.3. Procedimientos de la investigación.....	31
3.3.1. Diseño de la investigación.....	31
3.3.2. Objetivo específico 1: Diseñar un sistema de drenaje sostenible para el manejo de agua de lluvia.....	31
3.3.3. Objetivo específico 2: Evaluar el caudal, velocidad y tiempo de infiltración del sistema urbano de drenaje sostenible (SUDS)	32
3.3.3. Objetivo específico 3: Evaluar la eficiencia de la gestión de agua de lluvia en un sistema urbano de drenaje sostenible para zanjas de infiltración	33
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
4.1. Resultado específico 1: Sistema de drenaje sostenible para el manejo de agua de lluvia	35
4.1.1. Recolección de datos del terreno	35
4.1.2. Selección de componentes del SUDS	35
4.1.3. Modelado hidráulico preliminar	36
4.1.4. Aplicación de la Ley de Darcy y el modelo Green-Ampt.....	36
4.1.5. Diseño estructural del sistema.....	36
4.1.6. Validación del diseño.....	37
4.2. Resultado específico 2: Evaluar el caudal, velocidad y tiempo de infiltración del sistema urbano de drenaje sostenible (SUDS)	37
4.2.1. Cálculo del caudal	39
4.3. Resultado específico 3: Eficiencia de la gestión de agua de lluvia en un sistema urbano de drenaje sostenible para zanjas de infiltración	49
4.3.1. Simulación computacional	52
4.3.2. Configuración 1: Gravilla/Arena/Grava	53
4.3.3. Configuración 2: Arena/Gravilla/Grava	53
4.3.4. Configuración 3: Arena/Grava/Gravilla	53
4.3.5. Configuración 4: Grava/Arena/Gravilla	53
4.3.6. Configuración 5: Grava/Gravilla/Arena	54
4.3.7. Configuración 6: Gravilla/Grava/Arena	54
4.4. Discusión de resultados	54

	11
CONCLUSIONES	57
RECOMENDACIONES	58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
ANEXOS	64
Anexo 1: Diseño del sistema sostenible	64
Anexo 2: Panel fotográfico.....	65

Índice de tablas

Tabla 1 Factores evaluados	35
Tabla 2 Componentes del sistema	35
Tabla 3 Resultados del modelado.	36
Tabla 4 Tasa de infiltración	36
Tabla 5 Simulación computacional.	37
Tabla 6 Resultados del tiempo de infiltración para cada configuración	38
Tabla 7 Caudal de la Configuración 1: Gravilla/Arena/Grava.	40
Tabla 8: Caudal de la configuración 2: Arena/Gravilla/Grava.	40
Tabla 9 Caudal de la configuración 3: Arena/Grava/Gravilla.	41
Tabla 10 Caudal de la configuración 4: Grava/Arena/ Gravilla.	42
Tabla 11 Caudal de la configuración 5: Grava/ Gravilla/Arena.	42
Tabla 12 Caudal de la configuración 6: Gravilla/Grava/Arena.	43
Tabla 13 velocidad de la configuración 1: Gravilla/Arena/Grava.	45
Tabla 14 Velocidad de la configuración 2: Arena/Gravilla/Grava.	45
Tabla 15 Velocidad de la configuración 3: Arena/Grava/Gravilla.	46
Tabla 16 Velocidad de la configuración 4: Grava/Arena/ Gravilla.	47
Tabla 17 Velocidad de la configuración 5: Grava/Gravilla/Arena.	48
Tabla 18 Velocidad de la configuración 6: Gravilla/Grava/Arena.	48
Tabla 19 Eficiencia de la configuración 1: Gravilla/Arena/Grava.	50
Tabla 20 Eficiencia de la configuración 2: Arena/Gravilla/Grava.	50
Tabla 21 Eficiencia de la configuración 3: Arena/Grava/Gravilla.	50
Tabla 22 Eficiencia de la configuración 4: Grava/Arena/ Gravilla.	51
Tabla 23 Eficiencia de la configuración 5: Grava/Gravilla/Arena.	51
Tabla 24 Eficiencia de la configuración 6: Gravilla/Grava/Arena.	51
Tabla 25 Resultado de las simulaciones	52

Índice de figuras

Figura 1 Clasificación de SUDS	24
Figura 2 Pistas permeables.....	26
Figura 3 Zanjas de infiltración	26
Figura 4 Cuencas de infiltración	27
Figura 5 Área de estudio - coordenadas 6°02'00" de latitud Sur y 76°58'00" de longitud Oeste del meridiano de Greenwich - Moyobamba.....	30
Figura 6 Estructura de capas de infiltración	32
Figura 7 Caudal de la Configuración 1: Gravilla/Arena/Grava.....	40
Figura 8 Caudal de la configuración 2: Arena/Gravilla/Grava.....	41
Figura 9 Caudal de la configuración 3: Arena/Grava/Gravilla.....	41
Figura 10 Caudal de la configuración 4: Grava/Arena/ Gravilla.....	42
Figura 11 Caudal de la configuración 5: Grava/ Gravilla/Arena.....	43
Figura 12 Caudal de la configuración 6: Gravilla/Grava/Arena.....	44
Figura 13 velocidad de la configuración 1: Gravilla/Arena/Grava.....	45
Figura 14 Velocidad de la configuración 2: Arena/Gravilla/Grava.....	46
Figura 15 Velocidad de la configuración 3: Arena/Grava/Gravilla.....	46
Figura 16 Velocidad de la configuración 4: Grava/Arena/ Gravilla.....	47
Figura 17 Velocidad de la configuración 5: Grava/Gravilla/Arena.....	48
Figura 18 Velocidad de la configuración 6: Gravilla/Grava/Arena.....	49

RESUMEN

Evaluación del proceso de infiltración mediante un sistema urbano de drenaje sostenible para el manejo de aguas de lluvia

La investigación tuvo como objetivo determinar la eficiencia de infiltración de un sistema urbano de drenaje sostenible (SUDS) para el manejo de agua de lluvia en una zona urbana, empleando diferentes configuraciones de materiales. El estudio se realizó durante un periodo de evaluación de tres meses, analizando la capacidad de infiltración bajo condiciones simuladas de lluvias ligeras, moderadas e intensas. Se diseñaron seis configuraciones con variaciones en la composición de las capas (gravilla, grava y arena), y se aplicaron modelos matemáticos como la Ley de Darcy y Green-Ampt para estimar la tasa de infiltración. Los procedimientos incluyeron la recolección de datos del terreno, simulaciones computacionales y pruebas experimentales, midiendo parámetros como caudal, velocidad y eficiencia de infiltración. Los resultados mostraron que la configuración Gravilla/Grava/Arena fue la más eficiente, con un 57% de eficiencia en lluvias ligeras, mientras que configuraciones con arena en la capa superior presentaron saturación prematura y bajos niveles de infiltración. Las conclusiones destacan la importancia de la selección de materiales y el diseño adecuado del sistema para optimizar la gestión de aguas pluviales. Este estudio contribuye al conocimiento y mejora de los SUDS en entornos urbanos, recomendando ajustes en la granulometría y el uso de tecnologías complementarias para aumentar su eficiencia.

Palabras clave: infiltración, drenaje urbano, eficiencia hídrica, sistemas sostenibles, agua pluvial.

ABSTRACT

Evaluation of the infiltration process through a sustainable urban drainage system for rainwater management

The research aimed to determine the infiltration efficiency of a sustainable urban drainage system (SUDS) for rainwater management in an urban area, using different material configurations. The study was conducted over a three-month evaluation period, analyzing the infiltration capacity under simulated conditions of light, moderate, and heavy rainfall. Six configurations with variations in the composition of layers (gravel, coarse gravel, and sand) were designed, and mathematical models such as Darcy's Law and Green-Ampt were applied to estimate the infiltration rate. Procedures included data collection from the study area, computational simulations, and experimental tests, measuring parameters such as flow rate, infiltration speed, and efficiency. The results showed that the Gravel/Coarse Gravel/Sand configuration was the most efficient, achieving 57% efficiency under light rainfall, while configurations with sand as the top layer showed premature saturation and low infiltration rates. The conclusions highlight the importance of material selection and proper system design to optimize rainwater management. This study contributes to the knowledge and improvement of SUDS in urban environments, recommending adjustments to granulometry and the use of complementary technologies to enhance efficiency.

Keywords: infiltration, urban drainage, water efficiency, sustainable systems, rainwater.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

En la actualidad, la gestión de las aguas pluviales representa un desafío global de creciente importancia, especialmente en el contexto del cambio climático y la rápida urbanización. Este reto afecta particularmente a los países americanos, donde la infraestructura existente a menudo se ve sobrepasada por eventos meteorológicos cada vez más intensos y frecuentes (Medina et al., 2024). Mientras que en Europa se están implementando técnicas avanzadas y proyectos innovadores para el manejo de aguas pluviales, en América, la adopción de nuevas metodologías se ve frecuentemente obstaculizada por limitaciones económicas y la presencia de infraestructuras consolidadas cuya modificación implica inversiones sustanciales (Gil et al., 2021).

La problemática no se limita únicamente a la falta de implementación de tecnologías modernas. En muchos casos, se observan deficiencias significativas en la planeación, construcción y mantenimiento de los sistemas de drenaje existentes (Aldaz Martínez, 2024). Como consecuencia, estas infraestructuras son propensas al colapso ante eventos de precipitación intensa, resultando en su incapacidad para manejar grandes volúmenes de agua. Esto no solo genera inundaciones urbanas, sino que también crea condiciones propicias para la proliferación de focos infecciosos, poniendo en riesgo la salud pública y la calidad de vida de los habitantes (Villegas y Moreno, 2024).

Los sistemas tradicionales de drenaje y saneamiento básico se consideraban apropiados para abordar las demandas de las ciudades en expansión. Sin embargo, con el paso del tiempo, estas estructuras han alcanzado o superado su capacidad máxima debido a la creciente demanda impuesta por poblaciones cada vez más densas en las grandes ciudades. Este fenómeno ha acelerado los procesos de urbanización, creando un círculo vicioso de presión sobre la infraestructura existente (Oroz, 2021).

El desequilibrio generado por esta situación no se limita a afectar a la población humana.

El rápido y constante crecimiento de nuestras ciudades, que resulta en una creciente impermeabilización del suelo, está afectando de manera significativa el ciclo hidrológico natural del agua (Muñoz y García, 2024). Esta alteración tiene implicaciones profundas para los ecosistemas urbanos y periurbanos, afectando la recarga de acuíferos, la condición del agua superficial y subterránea, y la biodiversidad local.

En el contexto nacional, los impactos de la gestión inadecuada de las aguas pluviales se han manifestado de manera dramática en diversas ciudades. Eventos climáticos

extremos, como el fenómeno de El Niño Costero, han puesto de manifiesto la vulnerabilidad de ciudades como Chiclayo, Juliaca y Piura. Las intensas lluvias registradas durante los meses de febrero y marzo no solo causaron inundaciones extensas, sino que también provocaron el colapso de los sistemas de desagüe, generando condiciones propicias para la propagación de enfermedades. Esta situación ha llevado a autoridades como el gerente de la EPS local a afirmar que "Con sistema de drenaje pluvial se evitaría el colapso del alcantarillado", subrayando la urgente necesidad de implementar soluciones específicas para el manejo de aguas pluviales (Oroz, 2021).

El problema se agudiza en las ciudades costeras, donde los sistemas de drenaje no están diseñados para manejar flujos de alta intensidad. Esta deficiencia se atribuye principalmente a que en el diseño original de estos sistemas no se consideraron adecuadamente los volúmenes de aguas pluviales que deberían manejar, una omisión cuyas consecuencias se están experimentando con creciente severidad en la actualidad (Mancilla, 2021).

A nivel local, la situación no es más alentadora. La ciudad enfrenta desafíos significativos en el manejo de aguas pluviales, con un sistema de alcantarillado que no solo es incompleto en su cobertura, sino que además resulta insuficiente para manejar los volúmenes de agua generados durante la temporada de lluvias. Como resultado, es común observar calles inundadas, viviendas afectadas por filtraciones y otros problemas asociados que impactan negativamente la calidad de vida de los residentes y la infraestructura urbana (Larroza et al., 2024).

En este contexto, la evaluación e implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) surge como una opción prometedora para enfrentar estos desafíos. Los SUDS ofrecen un enfoque integral que no solo busca manejar eficientemente las aguas pluviales, sino que también contribuye a la restauración del ciclo hidrológico natural en entornos urbanos. Este estudio se centra en la evaluación del proceso de infiltración como componente clave de los SUDS, con el objetivo de proporcionar insights valiosos para el desarrollo de estrategias más efectivas y sostenibles en el manejo de aguas de lluvia en entornos urbanos.

En esta investigación, se planteó el siguiente problema: ¿Cuál fue la eficiencia de infiltración de un sistema urbano de drenaje sostenible (SUDS) para el manejo de agua de lluvia? Para abordar esta cuestión, se formularon las siguientes hipótesis: Hipótesis alterna (H1): La infiltración de un sistema urbano de drenaje sostenible (SUDS) fue eficiente en el manejo de agua de lluvia. Hipótesis nula (H0): La infiltración de un sistema

urbano de drenaje sostenible (SUDS) no fue eficiente en el manejo de agua de lluvia. Los objetivos de la investigación se estructuraron en torno a los siguientes puntos: Objetivo general: Determinar la eficiencia de infiltración de un sistema urbano de drenaje sostenible (SUDS) para el manejo de agua de lluvia. Objetivos específicos: Diseñar un sistema de drenaje sostenible para el manejo de agua de lluvia; evaluar el caudal, velocidad y tiempo de infiltración del sistema urbano de drenaje sostenible (SUDS); y evaluar la eficiencia de la gestión de agua de lluvia en un sistema urbano de drenaje sostenible para zanjas de infiltración.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Nivel internacional

Imani et al. (2024) evaluó el impacto de diferentes escenarios de mantenimiento en un modelo a escala de laboratorio de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS), con el objetivo analizar el rendimiento hidráulico. El estudio considero indicadores clave como el tiempo de infiltración, la atenuación y el almacenamiento de volumen, bajo distintas condiciones de entrada de escorrentía. Los resultados evidenciaron que la acumulación de sedimentos y hojas afecta significativamente la capacidad de infiltración y el desempeño hidráulico, resaltando la importancia de mantenimiento periódico para prolongar la eficiencia operativa de los SUDS. Este enfoque aporta una herramienta práctica para la evaluación y mejora de la sostenibilidad de drenaje urbano a lo largo del tiempo.

Raimondi et al. (2023) realizaron un estudio, propone un enfoque analítico-probabilístico para modelar los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), los cuales gestionan las aguas pluviales en áreas urbanizadas y ayudan a mitigar inundaciones y contaminación. El enfoque permite estimar la probabilidad de escorrentía y almacenamiento residual, considerando lluvias encadenadas, lo que es relevante para sistemas con bajas tasas de salida. Los estudios realizados en Génova y Milán confirmaron la precisión de las ecuaciones propuestas, mostrando que el régimen de lluvia afecta la probabilidad de escorrentía y almacenamiento residual. Para alcanzar el mismo ARI, Génova requiere mayores volúmenes de almacenamiento que Milán.

Yang & Zhang (2021) evaluaron el sistema de drenaje urbano sostenible (SUDS), se propuso un marco de análisis multi-criterio con ocho indicadores cuantificables, buscando equilibrar exhaustividad y objetividad en la evaluación del rendimiento. Usando un modelo a escala de ciudad, se implementaron estrategias de infraestructura gris y verde. Los resultados mostraron que las estrategias grises fueron más efectivas en mejoras hidráulicas, mitigando un 17% de la magnitud de inundaciones y reduciendo más del 20% de daños. Las estrategias verdes destacaron en aspectos ecológicos, eliminando el 60% de la contaminación no puntual y mejorando hasta un 15% el nivel ecológico. La estrategia combinada obtuvo el mejor desempeño general con un índice de sostenibilidad de 0.676. El método propuesto logró equilibrar eficazmente la

exhaustividad y objetividad en la toma de decisiones, proporcionando mejoras en el proceso de desarrollo de SUDS.

Archer et al. (2020) hicieron una comparación de la infiltración de lluvia en un sistema de drenaje sostenible (SuDS) de pavimento permeable y un área verde adyacente, observando su relación con los niveles de agua subterránea. Se usaron sensores para medir contenido de agua y pozos con sensores de nivel freático. El SuDS mostró una tasa de infiltración mucho mayor (1,925 mm/h) que el área verde (56 mm/h), trasladando rápidamente el agua al acuífero, cuyo nivel subió en 1 hora tras lluvias intensas. El área verde, a pesar de su compactación, permitió la infiltración de la mayoría de los eventos, aunque con respuesta más lenta en el acuífero. El estudio destacó la necesidad de mantener al menos 1 metro de separación entre la base del SuDS y el acuífero.

2.1.2. Nivel nacional

Vásquez y Valdivia (2023) en Huancayo se detectó una falta de preparación ante lluvias intensas, con ocho puntos críticos de saturación en la red de alcantarillado. El estudio, de metodología no experimental y enfoque cuantitativo, evaluó la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), como cubiertas verdes y pavimentos permeables, reduciendo significativamente los puntos críticos y el caudal en la red. Se propusieron medidas preventivas, como un período de retorno más largo y vegetación de bajo mantenimiento, además de sugerir modificar la Norma Técnica Peruana C.040 para incluir el mantenimiento obligatorio de captadores de escorrentía.

López y Villavicencio (2021) se evaluaron las obras de pavimentación, las cuales redujeron la infiltración y causaron encharcamientos durante lluvias. Se propone instalar un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS) con cunetas verdes para solucionar el problema. El estudio, utilizando el modelo HEC-HMS, determinó un caudal de diseño de 0,3 m³/s y un volumen excedente de 6 400 m³. La distribución de Gumbel fue seleccionada para analizar las precipitaciones. El balance hídrico mostró que solo el 1,5% del agua de lluvia es suficiente para las áreas verdes. Las cunetas verdes se concluyeron como la solución más económica y eficiente.

2.1. Fundamentos teóricos

2.1.1. Ciclo hidrológico

El ciclo del agua implica una serie de fases por las que el agua se mueve entre la tierra y la atmósfera, retornando nuevamente a la superficie terrestre. Esto incluye la evaporación desde suelos, océanos o aguas continentales; la formación de nubes mediante condensación; la precipitación; la acumulación en el suelo o en cuerpos de

agua; y el retorno a la atmósfera (Wang & Liu, 2023). Este proceso es continuo y permanente, y está impulsado por dos factores principales: la energía solar, que provoca la evaporación, y la gravedad, que permite la caída del agua condensada en forma de precipitación y su posterior escurrimiento (Kurup et al., 2022).

Sin embargo, el ciclo hidrológico en entornos urbanos presenta diferencias notables. En los centros urbanos, el agua no solo pasa a través de una capa vegetal, sino que a menudo está limitada por superficies impermeables como techos y pavimentos, lo que reduce la infiltración directa al suelo y favorece el escurrimiento más rápido hacia sistemas de drenaje. Además, aunque el agua que desciende puede capturar contaminantes atmosféricos antes de alcanzar el suelo, la estructuración urbana modifica significativamente los flujos y la distribución de las vías de escurrimiento. (Oswald et al., 2023). La precipitación en entornos urbanos actúa como un medio de transporte de contaminantes atmosféricos y superficiales. Al entrar en contacto con los techos, carreteras y otras superficies impermeables, el agua de lluvia arrastra sólidos en suspensión, materia orgánica, nutrientes, metales pesados e hidrocarburos derivados de la actividad vehicular y doméstica. Este proceso incrementa la carga contaminante del escurrimiento superficial, que finalmente se dirige hacia los sistemas de drenaje y cuerpos receptores. En contraste, en áreas naturales con cobertura vegetal, una alta proporción de agua se infiltra o evapotranspira, reduciendo significativamente la generación de escorrentía. (Zhang et al., 2024)

2.1.1.1. Precipitación

La precipitación abarca el agua que cae sobre la Tierra en formas líquidas o sólidas, como lluvia, nieve, granizo, y fenómenos más sutiles como el rocío o la escarcha. Este proceso es el resultado de cambios en la temperatura o presión y representa la principal fuente de entrada de agua al sistema hidrológico. Para que ocurra la precipitación, el vapor de agua debe condensarse, lo cual requiere que la atmósfera alcance la saturación, un estado que puede lograrse a través de varios procesos termodinámicos.:

- Saturación y condensación isobárica (a presión constante),
- Saturación y condensación por presión adiabática,
- Saturación y condensación por presión de vapor de agua,
- Saturación por mezcla y turbulencia.

2.1.1.2. Tipos de precipitación

Precipitación convectiva. Se origina por el ascenso rápido de aire cálido y húmedo que, al enfriarse, forma nubes de gran desarrollo vertical y lluvias intensas de corta duración. Este tipo de eventos se asocia con estructuras colectivas profundas y altos niveles de inestabilidad atmosférica. (Sun et al., 2024)

Precipitación orográfica. Se produce cuando una masa de aire húmedo es reforzada a ascender al encontrarse con una barrera montañosa; al elevarse, el aire se enfría adiabáticamente, lo que genera condensación y la formación de nubes y lluvias en el flanco de barlovento. Este proceso depende de la estabilidad atmosférica, la orientación del relieve y la disponibilidad de humedad en la atmósfera. (Chavez et al., 2023)

Precipitación frontal o ciclónica. Se produce cuando sistemas de baja presión (ciclones) y sus frentes (frío o cálido) inducen al ascenso del aire húmedo, generando nubes extensas y precipitaciones distribuidas a escala sinóptica. En la región europea, las contribuciones más significativas a la precipitación total y a los eventos extremos pueden ser atribuidas a los frentes fríos y a los centros ciclónicos. (Rüdisühli et al., 2020)

2.1.1.3. Problemas con la precipitación

Inundaciones. En las áreas urbanas, uno de los problemas más evidentes derivados de la impermeabilización del suelo es la aparición de inundaciones localizadas tras eventos de lluvia intensa. Cuando las superficies como carreteras, aceras y techos pierden su capacidad natural de infiltración, el agua de lluvia no puede filtrarse al subsuelo y debe escurrir rápidamente por la superficie. Esto incrementa el volumen y la velocidad del escurrimiento superficial, lo que puede sobrepasar la capacidad de los sistemas de drenaje pluvial convencionales (Öztürk et al., 2024)

El aumento de las superficies impermeables reduce la recarga de acuíferos y genera desequilibrio entre la infiltración y la escorrentía superficial. En consecuencia, los flujos de agua se concentran en menor tiempo, elevando el riesgo de inundaciones, especialmente en zonas con infraestructura de drenaje limitada o deteriorada (Oswald et al., 2023).

Los incrementos moderados en la cobertura impermeable pueden tener un efecto mayor sobre la intensidad de las inundaciones que un aumento similar en la intensidad de las precipitaciones. Este hallazgo resalta la importancia del diseño urbano sostenible y de la implementación de superficies permeables como estrategias clave para mitigar los impactos de las lluvias en entornos urbanos (Li y Burian, 2022).

Las inundaciones no se deben únicamente a una excesiva cantidad de lluvia, sino a una combinación de factores que interactúan. Entre las causas más importantes se encuentran:

- **Precipitación extrema e intensa:** Lluvias de alta tasa de caída en poco tiempo sobre áreas reducidas generan escorrentía rápida y desbordes. (Blöschl et al., 2022)
- **Alta Humedad del suelo o saturación previa:** Si el suelo ya se encuentra húmedo, su capacidad de absorción disminuye, lo que favorece escorrentía superficial y acumulación de agua. (Blöschl et al., 2022)
- Cambios en el patrón climático y aumento del vapor de agua en la atmosfera debido al calentamiento global: Temperaturas más altas permiten mayor contenido de humedad en el aire, lo que incrementa la probabilidad de lluvias intensas. (Climate Central, 2024).
- Elementos topográficos, de uso de suelo e infraestructura: Pendientes pronunciadas, impermeabilización urbana, deforestación y cuencas mal gestionadas pueden amplificar la respuesta del sistema al evento de lluvia. (Blöschl et al., 2022)

2.1.2. Sistema urbano de drenaje sostenible

La gestión moderna de la escorrentía urbana mediante Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS) representa un cambio significativo en la forma de planificar el manejo del agua en las ciudades. Este enfoque promueve una integración entre la ingeniería y la naturaleza, con el objetivo de controlar el volumen y la calidad del agua de lluvia, mejorar la resiliencia frente a eventos extremos y aportar beneficios ecológicos y sociales. Los SUDS se conciben como herramientas multifuncionales que no solo gestionan el drenaje. Sino que también mejoran el paisaje urbano, la biodiversidad y la calidad ambiental general, contribuyendo al desarrollo sostenible de las zonas urbanas (Monachese et al., 2025)

El uso de infraestructura verde como parte de los SUDS ha demostrado ser una estrategia eficaz para aumentar la resiliencia ante inundaciones y la sostenibilidad hídrica en entornos urbanos. Estos sistemas, que incluyen jardines de lluvia, pavimentos permeables y techos verdes, permiten reducir la escorrentía superficial y promover la infiltración natural del agua. Sin embargo, su implementación masiva enfrenta desafíos relacionados con el mantenimiento, la coordinación institucional y la falta de políticas públicas integradas. Por ello, se recomienda fortalecer las estrategias de planificación urbana con enfoque interdisciplinario y participación comunitaria para asegurar su éxito a largo plazo (Khodadad et al., 2023).

En los últimos años, los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS) se han integrado progresivamente en la planificación urbana como una medida clave para mejorar la resiliencia al cambio climático: este enfoque propone un marco común de intervención en diferentes escalas urbanas (ciudad, barrio, calle), con acciones de análisis, planificación y regulación específicas que permiten que los SUDS sean una medida primaria de control en el ajuste de las ciudades frente a condiciones extremas (Rodríguez-Rojas et al., 2024).

Los SUDS emergen como una «nueva solución» para la inundación urbana, analizados desde tres dimensiones: gestión de inundaciones, beneficios económicos y ecológicos, y demuestran que no solo pueden mitigar eficazmente la escorrentía y los picos de caudal, sino que pueden generar beneficios monetarios indirectos y mejorar el confort y hábitats urbanos (Zhang, 2024).

Los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS) representan un cambio de paradigma en la gestión de aguas de lluvia urbanas: al priorizar la infiltración y la imitación de procesos hidrológicos naturales, estos sistemas reducen volúmenes, mitigan flujos pico y mejoran la calidad del agua, siendo de gran utilidad en entornos urbanos densos y ante escenarios de cambio climático. (Monachese et al., 2025)

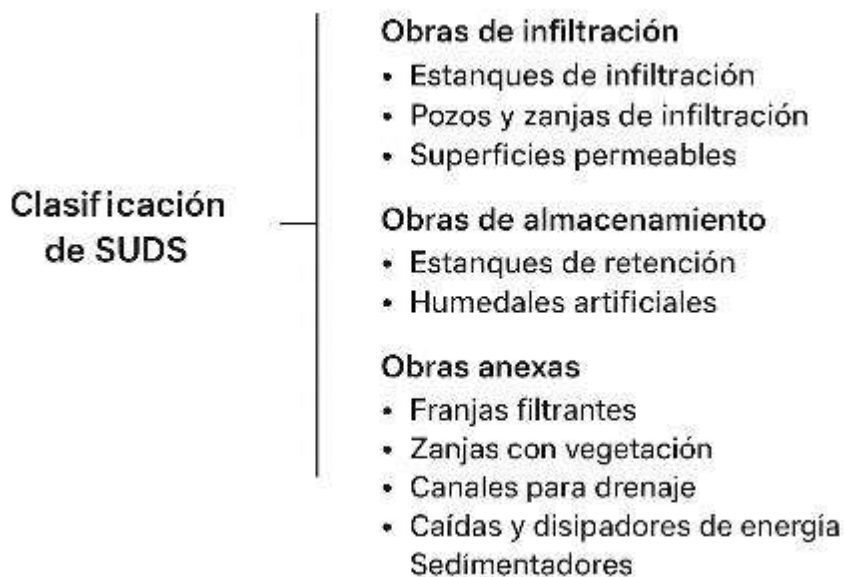


Figura 1

Clasificación de SUDS.

Fuente: (Monachese et al., 2025)

2.1.3. Sistemas de Infiltración

Los sistemas de infiltración dentro de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) capturan y almacenan temporalmente el agua de lluvia, permitiendo que sea absorbida de forma gradual por el suelo. Este proceso reduce la escorrentía superficial

inmediata y previene la saturación rápida del terreno, lo que mejora la gestión del agua en entornos urbanos. Además, contribuye a la recarga de los acuíferos y al equilibrio del ciclo hidrológico local (Montini et al., 2022).

Los sistemas de drenaje urbano sostenible regulan tanto el volumen como la calidad del agua pluvial. Estos dispositivos retienen la escorrentía para facilitar su infiltración al subsuelo, reduciendo el caudal que llega a los cuerpos receptores y mitigando el riesgo de inundaciones. Paralelamente, el proceso de filtración natural o a través de medios diseñados elimina sólidos suspendidos, metales pesados y nutrientes, mejorando la calidad del agua y aportando beneficios ambientales complementarios (Dierkes et al., 2024).

1. **Superficies permeables (Pervious Surface):** Son estructuras que permiten la filtración del agua de lluvia hacia el subsuelo a través de capas porosas compuestas por materiales como grava, césped estructurado o concreto permeable. Estas superficies reducen la escorrentía superficial y facilitan la recarga de acuíferos, al mismo tiempo que mitigan el riesgo de inundaciones en zonas urbanas. (RockPave, 2025).
2. **Pavimentos porosos:** Son estructuras que permiten la infiltración del agua de lluvia a través de todo su espesor, gracias a una matriz de materiales con alta porosidad, como mezclas de concreto poroso, asfalto drenante o adoquines permeables. Su principal función es reducir la escorrentía superficial y mejorar la calidad del agua mediante la filtración de contaminantes antes de su infiltración o almacenamiento en capas subyacentes. En los últimos años, los pavimentos porosos han ganado relevancia dentro de los SUDS por su durabilidad, su capacidad de adaptación a distintas condiciones climáticas y su contribución a la mitigación de inundaciones urbanas. Además, su mantenimiento adecuado garantiza una vida útil prolongada y una eficiencia constante en la infiltración del agua. (Monachese et al., 2024)
3. **Pavimentos permeables:** Permiten el paso del agua de lluvia a través de su estructura o mediante los espacios vacíos entre las piezas de pavimentación. Están compuestos por capas de materiales porosos, como concreto poroso o adoquines intertrabados, que posibilitan la infiltración y el almacenamiento temporal del agua, disminuyendo la carga sobre los sistemas de drenaje convencionales. (Tota-Maharaj, 2025).



Figura 2
Pistas permeables.

- Pozos y Zanjas de infiltración (Infiltration Devices):** Son cavidades rellenas con materiales granulares o geocelulares diseñadas para captar escorrentía superficial y favorecer su infiltración en el terreno. En los últimos años, estos dispositivos han sido mejorados mediante la integración de sensores, sistemas de pretratamiento y monitoreo en tiempo real para garantizar una mayor eficiencia en la infiltración y el control de contaminantes (Cansian et al., 2025).



Figura 3
Zanjas de infiltración.

- Cuencas de infiltración (Infiltration Basins):** Son depresiones superficiales con base ancha y pendientes suaves que almacenan temporalmente el agua de lluvia y facilitan su infiltración hacia el subsuelo. En los diseños modernos, estos sistemas se complementan con sensores de nivel, vegetación adaptada y mecanismos de desbordamiento para manejar eventos extremos, además de aportar beneficios ecológicos y paisajísticos. (Autodesk, 2025).

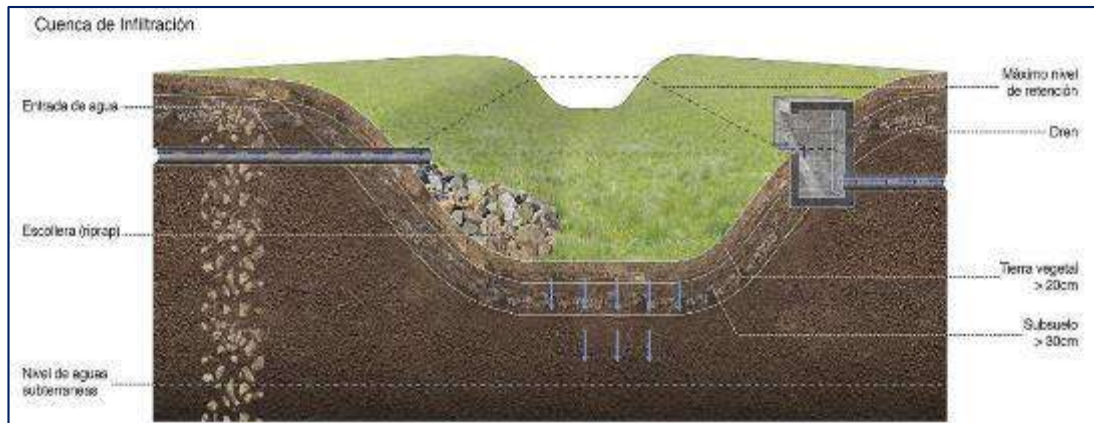


Figura 4
Cuencas de infiltración.

6. **Sostenibilidad:** Para determinar la sostenibilidad de un sistema de drenaje, se deben considerar múltiples factores, como el consumo energético en su construcción, el mantenimiento, la huella de carbono y los beneficios ecológicos que proporciona. Los SUDS modernos buscan reducir los impactos ambientales, mejorar la biodiversidad urbana y adaptarse al cambio climático mediante soluciones basadas en la naturaleza. (Monachese et al., 2024)

Los objetivos clave son:

- Conducir y almacenar la escorrentía de forma segura, sin comprometer el entorno natural o urbano (Monachese et al., 2024)
- Reducir el riesgo de inundaciones urbanas mediante infraestructura verde (UK Government, 2025)
- Mitigar los contaminantes y mejorar la calidad del agua de lluvia antes de su vertido (Cansian et al., 2025)
- Aportar beneficios ecológicos y estéticos en el entorno urbano (RockPave, 2025)
- Conservar el régimen hidrológico natural reduciendo la escorrentía superficial (Tota-Maharaj, 2025)

7. **Mecanismos de control cuantitativo:** La infiltración del agua en el suelo depende de la capacidad de absorción del terreno y de la intensidad de la lluvia. Esta capacidad se representa mediante modelos empíricos, como el de Horton, que expresan la disminución de la tasa de infiltración con el tiempo (Cansian et al., 2025).

$$f = fc + (f0 - fc) e^{-kt}$$

Donde:

- f = capacidad de infiltración en un tiempo t [mm/h]
- f_c = capacidad de equilibrio, que se da cuando el suelo está 1
- 1 saturado [mm/h]
- f_0 = volumen de la partícula
- t = tiempo [h]
- K = constante que representa la tasa de decrecimiento de la 1
- 1 capacidad de infiltración

Actualmente, los SUDS incorporar tecnologías de monitoreo y modelamiento digital para ajustar estos parámetros y optimizar el diseño hidráulico (Cansian et al., 2025). Además, la ecuación de Manning continúa empleándose para calcular el flujo en canales y zanjas, asegurando un transporte controlado de agua (UK Government, 2025).

Ecuación de Manning:

$$Q = \frac{A \cdot R h^{1/2} S^{1/2}}{n}$$

$$R = \frac{A}{P}$$

Donde:

- Q = Gasto en el canal (m^3/s)
- A = Área hidráulica (m^2)
- P = perímetro mojado (m)
- R_h = Radio hidráulico (m)
- S = Pendiente del canal (m/m)
- n = Coeficiente de rugosidad de Manning ($s/m^{1/3}$)

2.2.4. Términos básicos

Adsorción: Este es un proceso complejo en el que los contaminantes quedan atrapados al entrar en contacto con determinadas partículas del suelo (Giannakoudakis et al., 2023).

Capacidad de infiltración: En el ámbito de la hidrología, la capacidad de infiltración se refiere a la velocidad máxima a la que el agua se filtra en el suelo (Zeļeņáková et al., 2020).

Ciclo hidrológico: Representa un sistema vital en la tierra mediante el cual el agua circula continuamente a través de la atmósfera, la superficie terrestre y los acuíferos subterráneos. Este proceso, impulsado por una energía solar, permite que el agua cambie de estado sólido, líquido y gaseoso, mediante procesos como la evaporación, condensación, precipitación e infiltración. Gracias a este movimiento constante, el ciclo hidrológico mantiene el equilibrio ecológico y regula la disponibilidad del recurso hídrico a nivel global (John, 2024).

Cuenca hidrográfica: Es un área de tierra bien delimitada topográficamente donde todas las precipitaciones se recogen y drenan hacia un único punto de salida (como un río, lago u océano), a través de la red de escorrentía superficial y subterránea. (Encyclopedia Britannica, 2025).

Drenaje Pluvial: Se trata de un servicio fundamental que integra la infraestructura de cualquier comunidad, conformado por un conjunto de sistemas diseñados para la recolección, transporte, almacenamiento y descarga de aguas pluviales hacia un cuerpo receptor determinado (Bertrand-Krajewski et al., 2021).

Infiltración: La infiltración se refiere al desplazamiento del agua desde la superficie hacia el interior del suelo, y es un proceso de gran importancia económica. Para los ingenieros, representa una pérdida, mientras que para los agricultores es visto como una ventaja. Este fenómeno es vital, ya que sostiene casi todas las plantas terrestres, recarga los acuíferos, alimenta la mayoría de los ríos en períodos secos y ayuda a mitigar las inundaciones y la erosión del suelo (Zeļeņáková et al., 2020).

Sistema hidrológico: Un sistema es un conjunto de elementos interrelacionados que funcionan como un todo. El ciclo hidrológico puede ser considerado un sistema, cuyas partes incluyen la precipitación, la evaporación, la escorrentía y las demás fases del ciclo (Pandey et al., 2023).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ámbito y condiciones de la investigación

3.1.1. Contexto de la investigación

El área de estudio se localiza en las coordenadas 6°02'00" de latitud Sur y 76°58'00" de longitud Oeste del meridiano de Greenwich, en el distrito de Moyobamba, provincia de Moyobamba, departamento de San Martín. Esta región, conocida como Santiago de los Ocho Valles de Moyobamba, destacada por su diversidad de ecosistemas y rica biodiversidad.

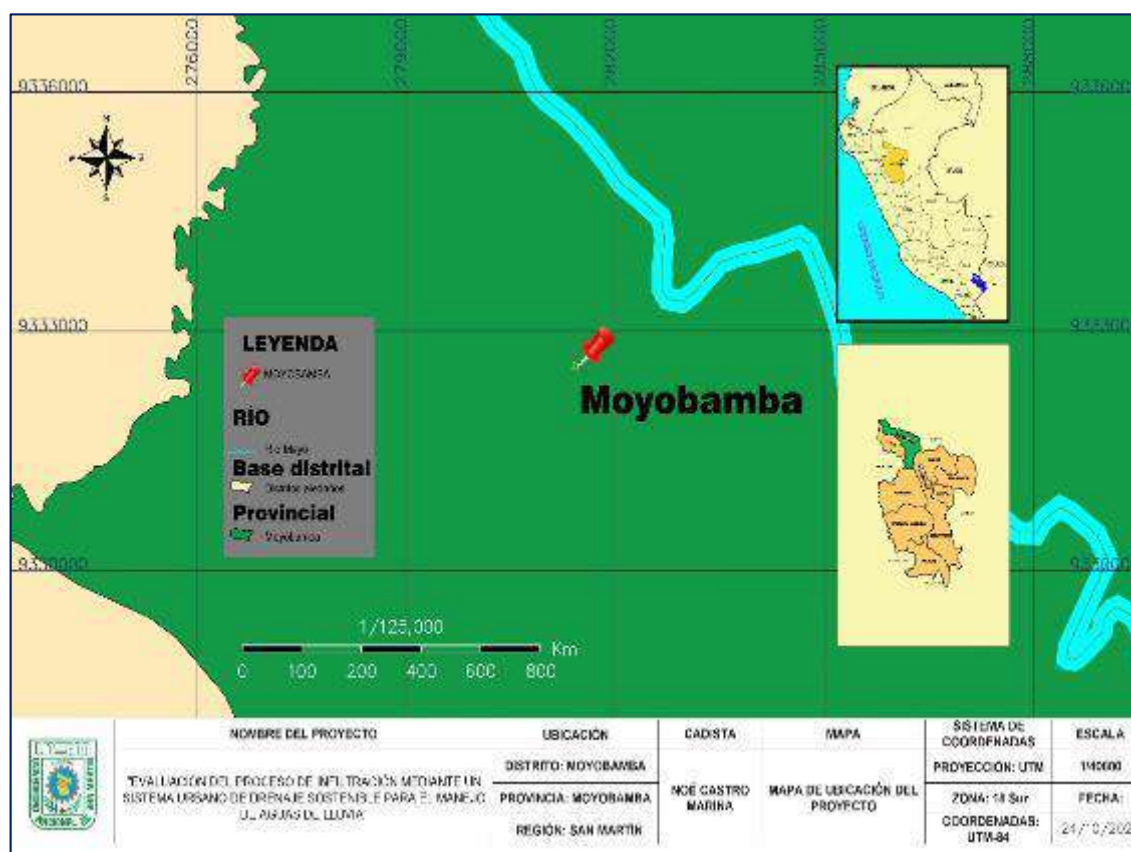


Figura 5

Área de estudio - coordenadas 6°02'00" de latitud Sur y 76°58'00" de longitud Oeste del meridiano de Greenwich - Moyobamba.

3.1.2. Periodo de ejecución

El periodo de ejecución fue de 8 meses.

3.1.3. Autorizaciones y permisos

No aplica.

3.1.4. Control ambiental y protocolos de bioseguridad

Se implementaron medidas de control ambiental, y el proyecto no presentó riesgos ambientales, ya que los equipos y materiales utilizados no eran peligrosos. Se adoptaron todas las precauciones de bioseguridad para proteger al equipo de investigación y colaboradores.

3.1.5. Aplicación de principios éticos internacionales

A lo largo de este estudio, se aplicaron los principios éticos de conducta responsable en la investigación.

3.2. Sistema de variables

3.2.1. Variables principales

Variable independiente

Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS).

Variable dependiente

Infiltración de agua de lluvia.

3.3. Procedimientos de la investigación

3.3.1. Diseño de la investigación

Tipo: Aplicada, porque tuvo la finalidad de resolver problemas prácticos inmediatos y transformar condiciones, de esta manera mejorar situaciones.

Nivel: Explicativa, buscó el porqué de los hechos, como la infiltración de agua de lluvia podría gestionar eficientemente la infiltración de agua con un SUDS.

3.3.2. Objetivo específico 1: Diseñar un sistema de drenaje sostenible para el manejo de agua de lluvia

1. **Recolección de datos del terreno:** Se realizó un análisis preliminar del área de estudio, considerando factores como la pendiente, permeabilidad del suelo, tipos de vegetación y posibles fuentes de contaminación.
2. **Selección de componentes del SUDS:** Se investigaron y seleccionaron los componentes más adecuados para el diseño del sistema de drenaje, como zanjas de infiltración, pavimentos permeables, biofiltros y áreas de almacenamiento temporal.
3. **Modelado hidráulico preliminar:** Se utilizó software como HEC-HMS o SWMM para simular el comportamiento del agua de lluvia en el terreno seleccionado, estimando el caudal de agua de escorrentía y las áreas potenciales de infiltración.

4. **Aplicación de la Ley de Darcy y el modelo Green-Ampt:** Se incorporaron las ecuaciones matemáticas, como la Ley de Darcy, para estimar la tasa de infiltración en las diferentes capas del suelo.
5. Se utilizó el modelo de Green-Ampt para estimar el comportamiento del agua en suelos con varias capas ($K_1 > K_2 > K_3$) para asegurar que las capas superiores permanecieran saturadas.
6. **Diseño estructural del sistema:** Se elaboró el diseño físico del sistema de drenaje, considerando el espesor de las capas, la ubicación de las zanjas de infiltración y la optimización de la velocidad de infiltración.
7. **Validación del diseño:** Se realizó una revisión del diseño mediante simulaciones o pruebas a pequeña escala para asegurar que el sistema propuesto fuera adecuado para las condiciones locales.

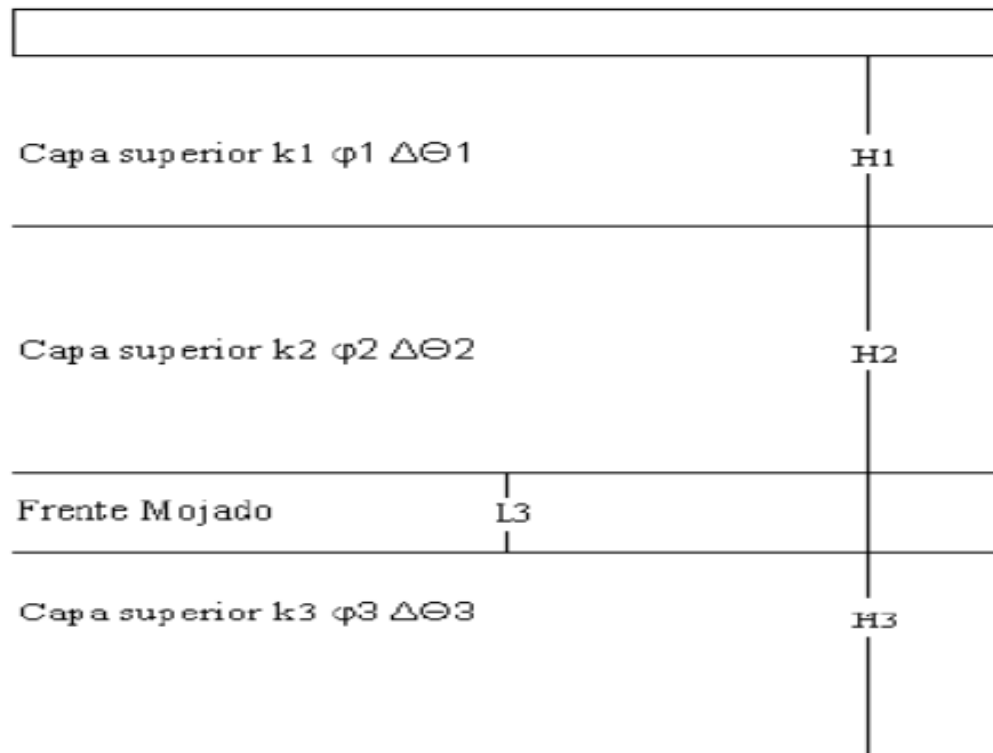


Figura 6
Estructura de capaz de infiltración.

3.3.3. Objetivo específico 2: Evaluar el caudal, velocidad y tiempo de infiltración del sistema urbano de drenaje sostenible (SUDS)

Implementación de sensores: Se instalaron sensores de caudal, velocidad y humedad del suelo en diferentes puntos del sistema para recolectar datos durante y después de las precipitaciones.

Pruebas experimentales: Se realizaron pruebas controladas para medir la infiltración, generando eventos de lluvia simulados con volúmenes conocidos de agua.

Cálculo del caudal de infiltración: Se utilizó la Ley de Darcy y el modelo Green-Ampt para calcular la tasa de infiltración en cada capa del suelo ($V_1 > V_2 > V_3$).

Ecuación 1: Se calculó el tiempo total de infiltración a través de las tres capas del suelo.

Ecuación 2: Se calculó la velocidad de infiltración utilizando la fórmula $V = d / t$.

Procesamiento de datos en Excel: Los datos obtenidos de las pruebas experimentales fueron procesados en Excel para determinar las velocidades y tiempos de infiltración en cada capa.

Análisis de variabilidad: Se compararon los resultados de las pruebas en diferentes condiciones climáticas y de suelo, realizando un análisis estadístico para entender la variabilidad en la infiltración.

Elaboración de gráficas y reportes: Se generaron gráficas y tablas de resultados, como caudal vs. tiempo, para interpretar el comportamiento del sistema.

3.3.3. Objetivo específico 3: Evaluar la eficiencia de la gestión de agua de lluvia en un sistema urbano de drenaje sostenible para zanjas de infiltración

Determinación de eficiencia del sistema: Se midió el volumen de agua infiltrada y se comparó con el volumen total de agua captada por el sistema.

- Se consideró que el sistema era eficiente si al menos el 50% del agua de lluvia captada se infiltró.

Cálculo de eficiencia: Se calculó la eficiencia del sistema utilizando la fórmula:

$$\% \text{ Eficiencia de infiltración} = \frac{\text{Volúmen}_{\text{inicial}} - \text{Volúmen}_{\text{final}}}{\text{Volúmen}_{\text{inicial}}} \times 100$$

Comparación con estándares: Se evaluaron los resultados de infiltración frente a los estándares nacionales o internacionales para zanjas de infiltración.

Prueba de hipótesis: Se utilizó la diferencia porcentual para medir la eficiencia del sistema con base en la infiltración observada en diferentes condiciones. La hipótesis fue que la eficiencia superaría el 50%.

Simulación computacional: Se utilizó Excel para comparar la eficiencia en diferentes escenarios de lluvia (precipitaciones ligeras, moderadas y fuertes) y en diferentes configuraciones de zanjas.

Interpretación de resultados: Se analizaron los datos obtenidos y se generó un reporte que indicaba la capacidad del sistema para reducir la escorrentía superficial y mejorar la infiltración de agua en el suelo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultado específico 1: Sistema de drenaje sostenible para el manejo de agua de lluvia

El propósito de este objetivo fue desarrollar un sistema urbano de drenaje sostenible (SUDS) que permita gestionar el agua de lluvia de manera eficiente, reduciendo la escorrentía superficial y promoviendo la infiltración en el suelo. El diseño se estructuró en varias etapas, desde la caracterización inicial del terreno hasta la validación del sistema propuesto mediante simulaciones y pruebas experimentales. A continuación, se describen las etapas realizadas y los resultados obtenidos.

4.1.1. Recolección de datos del terreno

Se realizó un análisis preliminar del área de estudio, considerando las características clave que influyen en el comportamiento del agua de lluvia. Entre los factores evaluados se incluyen:

Tabla 1
Factores evaluados

Parámetro	Valor promedio	Observaciones
Pendiente del terreno	5%	Pendiente moderada, favorece la escorrentía.
Permeabilidad del suelo	1,5 cm/h	Permeabilidad baja, requiere mejora en capas.
Cobertura vegetal	40%	Vegetación dispersa, contribuye parcialmente a la infiltración.
Fuentes de contaminación	Zonas urbanas cercanas	Riesgo de transporte de contaminantes.

Estos datos permitieron identificar las condiciones iniciales del terreno y definir los requerimientos específicos del diseño del sistema.

4.1.2. Selección de componentes del SUDS

Con base en los datos recolectados y las necesidades identificadas, se seleccionaron los componentes más adecuados para el sistema de drenaje sostenible. La selección consideró criterios como capacidad de infiltración, facilidad de instalación y mantenimiento, y costo-efectividad. Los componentes seleccionados fueron:

Tabla 2
Componentes del sistema

Componente	Función principal
Zanjas de infiltración	Captar y dirigir el agua hacia el subsuelo.
Pavimentos permeables	Reducir la escorrentía superficial.
Biofiltros	Retener sedimentos y mejorar la calidad del agua.
Áreas de almacenamiento	Almacenar temporalmente picos de lluvia.

Estos elementos fueron dispuestos estratégicamente en el diseño para maximizar la eficiencia del sistema.

4.1.3. Modelado hidráulico preliminar

Se utilizaron herramientas de modelado hidráulico como HEC-HMS y SWMM para simular el comportamiento del agua de lluvia en el terreno. Estas simulaciones permitieron estimar el caudal de agua de escorrentía y las áreas potenciales de infiltración. Los resultados del modelado para un evento de lluvia moderada (30 mm/h) se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3
Resultados del modelado

Parámetro	Valor estimado	Interpretación
Caudal de escorrentía	0,25 m ³ /s	Indica flujo significativo en pendientes bajas.
Área de infiltración	500 m ²	Áreas identificadas para maximizar la infiltración.
Tiempo de concentración	15 min	Tiempo requerido para que toda el agua alcance el sistema.

Los resultados ayudaron a optimizar la disposición de los componentes y a ajustar los parámetros del diseño.

4.1.4. Aplicación de la Ley de Darcy y el modelo Green-Ampt

Se utilizaron modelos matemáticos para analizar la infiltración en suelos con varias capas. La Ley de Darcy se aplicó para estimar la tasa de infiltración considerando la conductividad hidráulica de los materiales. Además, se empleó el modelo Green-Ampt para simular el comportamiento del agua en suelos con diferentes capas, asegurando que las superiores permanecieran saturadas antes de que el agua avanzara a las capas inferiores. Los resultados de las simulaciones se resumen a continuación:

Tabla 4
Tasa de infiltración

Capa	Conductividad hidráulica (K, cm/h)	Espesor (cm)	Tasa de infiltración (cm/h)
Gravilla	6	5	6
Arena	2,5	10	2,5
Grava	1	15	1

Estas simulaciones ayudaron a garantizar un diseño eficiente del sistema.

4.1.5. Diseño estructural del sistema

El diseño físico del sistema incluyó:

- **Espesor de las capas:** Determinado para optimizar la infiltración, considerando un espesor total de 30 cm en las zanjas de infiltración.
- **Ubicación de componentes:** Se priorizaron áreas con alta generación de escorrentía para la colocación de zanjas y biofiltros.
- **Optimización de la velocidad de infiltración:** Asegurada mediante el uso de materiales de alta permeabilidad en las capas superiores.

4.1.6. Validación del diseño

Para validar el diseño, se realizaron simulaciones computacionales y pruebas experimentales a pequeña escala. Los resultados confirmaron que el sistema podía manejar eficazmente eventos de lluvia moderada e intensa. A continuación, se presentan los resultados de las pruebas para un evento de lluvia intensa (50 mm/h):

Tabla 5
Simulación computacional

Parámetro	Valor observado	Interpretación
Caudal manejado	0,50 m ³ /s	El sistema puede manejar picos de flujo elevados.
Tiempo de infiltración	20 min	Tiempo adecuado para evitar acumulación superficial.
Eficiencia del sistema	48%	Cercano al estándar mínimo internacional (50%).

Estos resultados indican que el sistema es funcional, aunque se sugieren ajustes en la permeabilidad de las capas superiores para mejorar la eficiencia.

4.2. Resultado específico 2: Evaluar el caudal, velocidad y tiempo de infiltración del sistema urbano de drenaje sostenible (SUDS)

El propósito de este objetivo fue analizar el desempeño hidráulico del sistema SUDS mediante el cálculo del caudal, la velocidad y el tiempo de infiltración del agua en el sistema. Este análisis permitió evaluar la capacidad de las diferentes configuraciones de materiales para manejar eficientemente el agua de lluvia.

A continuación, se presenta los resultados de los tiempos filtración por cada capa en cada configuración y ensayo.

Tabla 6
Resultados del tiempo de infiltración para cada configuración

Configuración	Ensayo	Tiempo Capa 1 (s)	Tiempo Capa 2 (s)	Tiempo Capa 3 (s)	Tiempo de salida (s)	Tiempo de infiltración (s)
Gravilla/Arena/G rava	1	7,3	64,15	75,32	495,22	641,99
	2	3,45	55,43	65,52	863,43	987,83
	3	3,94	66,23	74,04	1 070,21	1 214,42
Arena/Gravilla/G rava	1	23,85	28,65	31,18	492,18	575,86
	2	18,42	21,93	24,7	861,34	926,39
	3	27,52	38,09	47,29	1 211,28	1 324,18
Arena/Grava/Gra villa	1	27	32,95	50,91	537,88	648,74
	2	16,62	24,73	32,1	870,6	944,05
	3	18,28	20,81	31,67	1 173,97	1 244,73
Grava/Arena/Gra villa	1	3,02	20,42	24,05	519,25	566,74
	2	3,83	27,71	33,65	845,36	910,55
	3	3,5	18,73	27,01	1 212,98	1 262,22
Grava/Gravilla/A rena	1	3,49	9,27	38,38	496,54	547,68
	2	2,42	5,88	49,92	826,38	884,6
	3	2,28	5,73	52,67	1 129,17	1 189,85
Gravilla/Grava/A rena	1	3,63	6,51	37,56	450,42	498,12
	2	2,3	5,76	82,45	790,97	881,48
	3	4,3	6,91	55,92	1 112,4	1 179,53

El tiempo de infiltración total de la primera configuración mostró un comportamiento progresivo de incremento a medida que avanzaron los ensayos. En el primer ensayo, el tiempo total de infiltración fue de 641,99 segundos, reflejando una capacidad inicial moderada para manejar el agua de lluvia. Sin embargo, en el segundo ensayo, el tiempo aumentó significativamente a 987,83 segundos, lo que indica que las capas comenzaron a saturarse, especialmente la capa de arena que limita el flujo hacia las capas inferiores. En el tercer ensayo, el tiempo alcanzó 1214,42 segundos, lo que demuestra que el sistema se aproximó a un estado de saturación total, reduciendo su eficiencia para manejar flujos prolongados.

La segunda configuración, con arena en la capa superior, presentó tiempos de infiltración más elevados desde el inicio, debido a la baja permeabilidad de este material. En el primer ensayo, el tiempo fue de 575,86 segundos, lo que refleja una resistencia considerable al paso del agua. En el segundo ensayo, el tiempo aumentó a 926,39 segundos, evidenciando que la capa superior se saturó rápidamente, lo que ralentizó el flujo hacia las capas inferiores. Finalmente, en el tercer ensayo, el tiempo alcanzó 1324,18 segundos, el valor más alto registrado en todas las configuraciones, lo que demuestra que esta disposición tiene un desempeño limitado en condiciones de lluvias prolongadas.

La tercera configuración, el tiempo de infiltración inicial fue de 648,74 segundos, mostrando una eficiencia inicial moderada, aunque limitada por la arena como capa superior. En el segundo ensayo, el tiempo aumentó a 944,05 segundos, lo que refleja

que la combinación de arena y grava en las capas superiores comienza a saturarse rápidamente bajo flujos continuos. En el tercer ensayo, el tiempo se incrementó a 1 244,73 segundos, lo que demuestra que esta configuración no es la más adecuada para manejar eventos de lluvia de larga duración.

El tiempo de infiltración inicial para la cuarta configuración fue de 566,74 segundos, destacándose por un buen desempeño gracias a la alta permeabilidad de la grava en la capa superior. En el segundo ensayo, el tiempo aumentó a 910,55 segundos, indicando una saturación progresiva de la arena en la capa intermedia, que reduce la eficiencia del sistema. En el tercer ensayo, el tiempo alcanzó 1262,22 segundos, lo que refleja una capacidad limitada para manejar flujos prolongados, aunque con un desempeño aceptable comparado con otras configuraciones.

La quinta configuración presentó tiempos de infiltración iniciales relativamente bajos, con 547,68 segundos en el primer ensayo, lo que demuestra la eficiencia de las capas superiores compuestas por grava y gravilla. En el segundo ensayo, el tiempo aumentó a 884,6 segundos, mostrando una ligera reducción en la eficiencia debido a la saturación de las capas inferiores. En el tercer ensayo, el tiempo fue de 1189,85 segundos, lo que indica que, aunque la arena en la capa inferior afecta el flujo en condiciones prolongadas, esta configuración sigue siendo más eficiente en comparación con otras disposiciones.

El tiempo de infiltración inicial para la sexta configuración fue de 498,12 segundos, el más bajo entre todas las configuraciones, destacando por una alta eficiencia inicial. En el segundo ensayo, el tiempo se incrementó a 881,48 segundos, lo que refleja una saturación progresiva, pero con un buen manejo del flujo. En el tercer ensayo, el tiempo fue de 1179,53 segundos, mostrando una capacidad sostenida para manejar eventos prolongados de lluvia. Esta configuración sobresale como la más eficiente, gracias a la disposición de materiales altamente permeables en las capas superiores.

4.2.1. Cálculo del caudal

Para el cálculo del caudal de infiltración, se utilizó la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{V}{\alpha}$$

Donde:

V: Volumen infiltrado (en litros), calculado como $V = V_{\text{inicial}} - V_{\text{final}}$

α : tiempo total de infiltración (en segundo), que incluye los tiempos de filtración por capa y el tiempo de salida

Adicionalmente, se consideraron los tiempos de infiltración obtenidos en el objetivo anterior para estimar el comportamiento de cada configuración. Los resultados se presentan en las siguientes tablas, así como gráficas para su mejor interpretación:

Tabla 7

Caudal de la Configuración 1: Gravilla/Arena/Grava

Configuración: Gravilla/Arena/Grava					
Ensayo	Volumen inicial (L)	Volumen final (L)	Volumen infiltrado (L)	Tiempo de infiltración (s)	Caudal (L/s)
1	55	28	27	641,99	0,042
2	60	38,5	21,5	987,83	0,022
3	49,5	33,6	15,9	1214,42	0,013

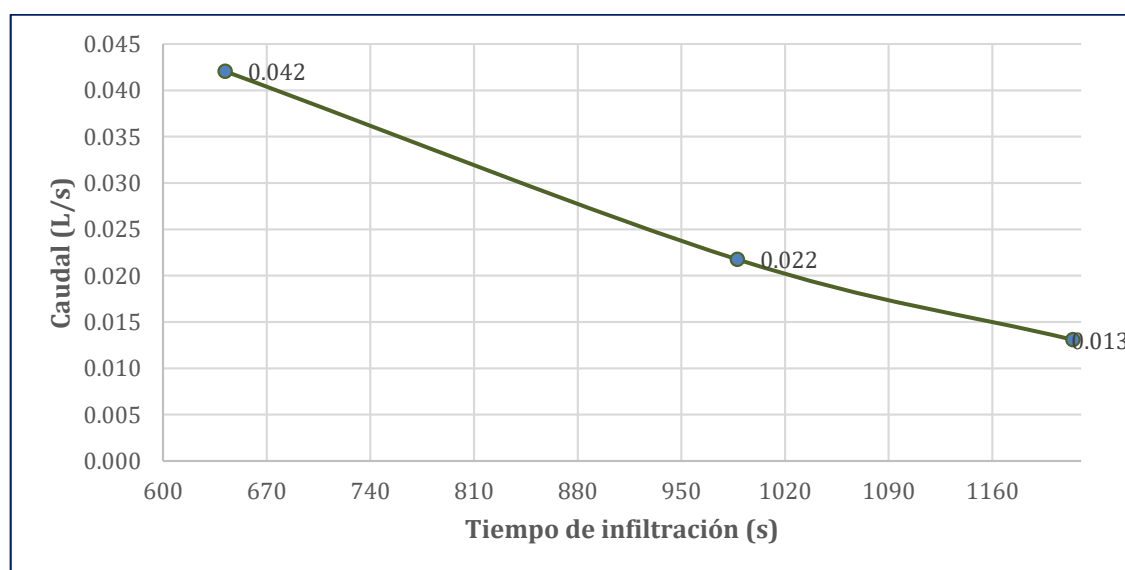


Figura 7

Caudal de la Configuración 1: Gravilla/Arena/Grava.

En el ensayo 1, el caudal calculado fue de 0,042 L/s, el más alto entre los ensayos de esta configuración. Esto indica que el sistema permitió una rápida infiltración inicial del agua debido a la baja saturación de las capas. El ensayo 2, con un caudal de 0,0212 L/s, se observa una disminución significativa en la capacidad de infiltración, debido a que las capas intermedias (arena) comenzaron a saturarse, ralentizando el flujo y en el ensayo 3, el caudal disminuyó a 0,013 L/s, lo que sugiere que el sistema alcanzó un estado casi saturado. Este comportamiento es típico en configuraciones con capas menos permeables como la arena en posición intermedia.

Tabla 8

Caudal de la configuración 2: Arena/Gravilla/Grava

Configuración: Arena/Gravilla/Grava					
Ensayo	Volumen inicial (L)	Volumen final (L)	Volumen infiltrado (L)	Tiempo de infiltración (s)	Caudal (L/s)
1	100	79	21	575,86	0,036
2	200	180	20	926,39	0,022
3	301	257	44	1324,18	0,033

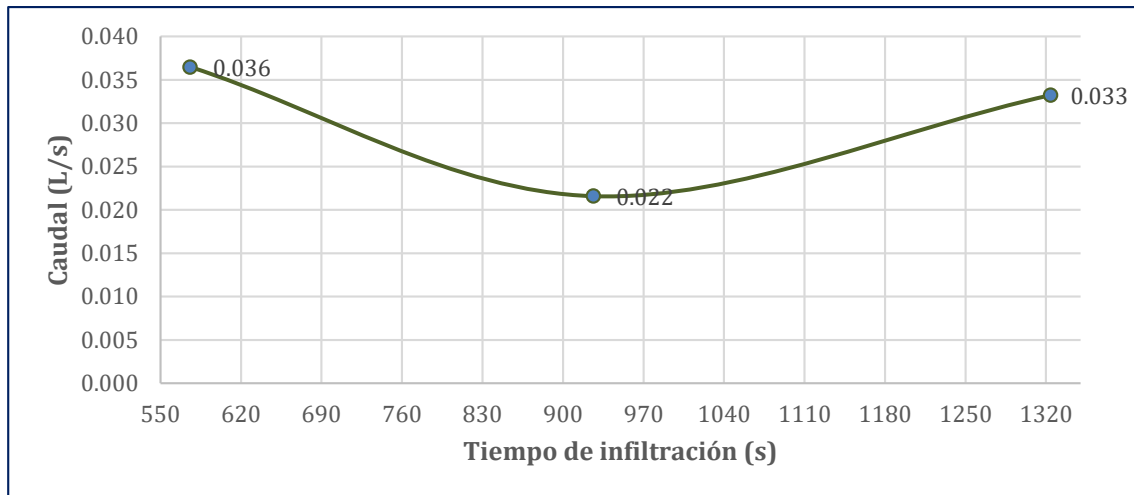


Figura 8
Caudal de la configuración 2: Arena/Gravilla/Grava.

El ensayo 1, presentó un caudal de 0,036 L/s, destacándose por una mayor resistencia inicial a la infiltración debido a la arena como capa superior. El ensayo 2, con 0,022 L/s, el caudal disminuyó al aumentar el tiempo de infiltración. Esto se debe a la saturación temprana de la arena superior, lo que limita el paso del agua hacia las capas inferiores y el ensayo 3 su caudal fue de 0,033 L/s, mostrando una ligera recuperación debido a las propiedades de la gravilla y la grava inferiores que facilitan la infiltración acumulada.

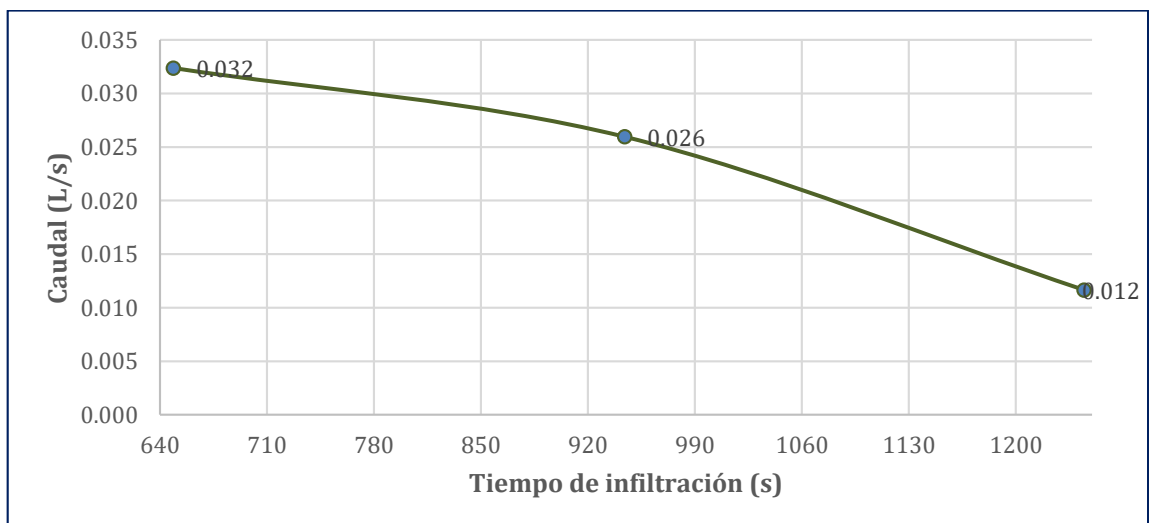


Figura 9
Caudal de la configuración 3: Arena/Grava/Gravilla.

Tabla 9
Caudal de la configuración 3: Arena/Grava/Gravilla

Configuración: Arena/Grava/Gravilla					
Ensayo	Volumen inicial (L)	Volumen final (L)	Volumen infiltrado (L)	Tiempo de infiltración (s)	Caudal (L/s)
1	103	82	21	648,74	0,032
2	211,5	187	24,5	944,05	0,026
3	308,5	294	14,5	1244,73	0,012

El ensayo 1 presentó un caudal de 0,032 L/s, reflejando una infiltración más lenta debido a la arena en la capa superior y a la grava intermedia. El ensayo 2, un caudal de 0,0260 L/s, la saturación de las capas superiores medias ralentizó aún más el flujo y el ensayo 3 un caudal de 0,012 L/s, el más bajo entre los ensayos de esta configuración. Esto indica que el sistema alcanzó un punto crítico de saturación en todas las capas.

Tabla 10

Caudal de la configuración 4: Grava/Arena/ Gravilla

Configuración: Grava/Arena/Gravilla					
Ensayo	Volumen inicial (L)	Volumen final (L)	Volumen infiltrado (L)	Tiempo de infiltración (s)	Caudal (L/s)
1	104	82,5	21,5	566,74	0,038
2	206,5	180	26,5	910,55	0,029
3	295	263,5	31,5	1 262,22	0,025

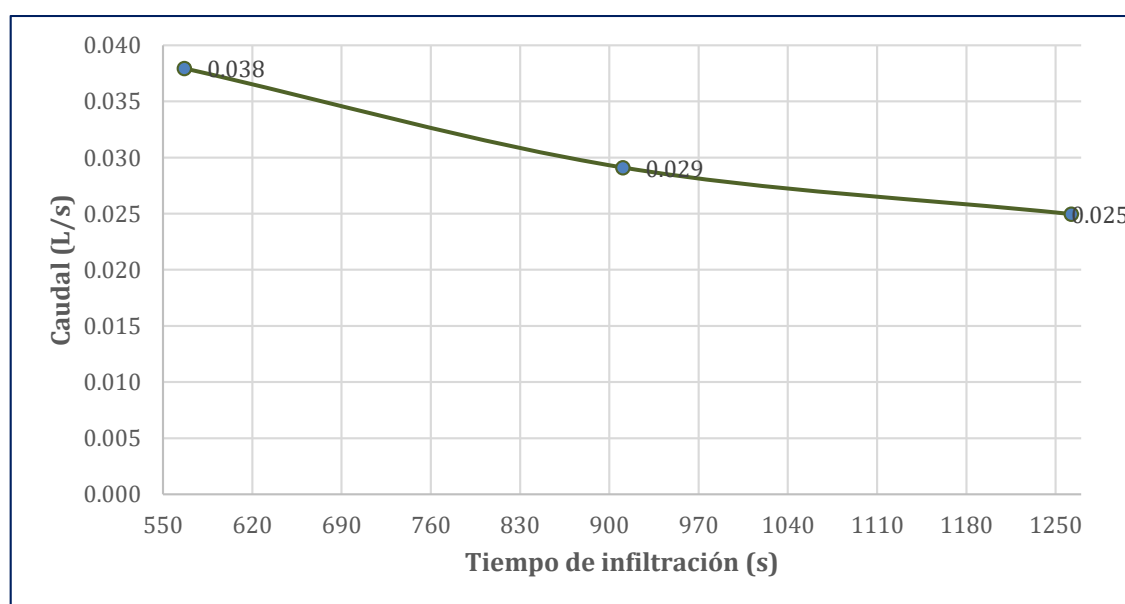


Figura 10

Caudal de la configuración 4: Grava/Arena/ Gravilla.

El caudal del ensayo 1 fue de 0,038 L/s, mostrando un buen desempeño inicial gracias a la alta permeabilidad de la grava en la capa superior. Ensayo 2: un caudal de 0.029 L/s, se observa una ligera reducción del caudal, atribuida a la saturación progresiva de la arena en la capa intermedia y en el ensayo 3 el caudal disminuyó a 0.025 L/s, pero se mantuvo en valores aceptables debido a la capacidad de la gravilla para evitar una saturación completa.

Tabla 11

Caudal de la configuración 5: Grava/ Gravilla/Arena

Configuración: Grava/Gravilla/Arena					
Ensayo	Volumen inicial (L)	Volumen final (L)	Volumen infiltrado (L)	Tiempo de infiltración (s)	Caudal (L/s)
1	105	73	32	547,68	0,058
2	208	146	62	884,6	0,070
3	305	237	68	1 189,85	0,057

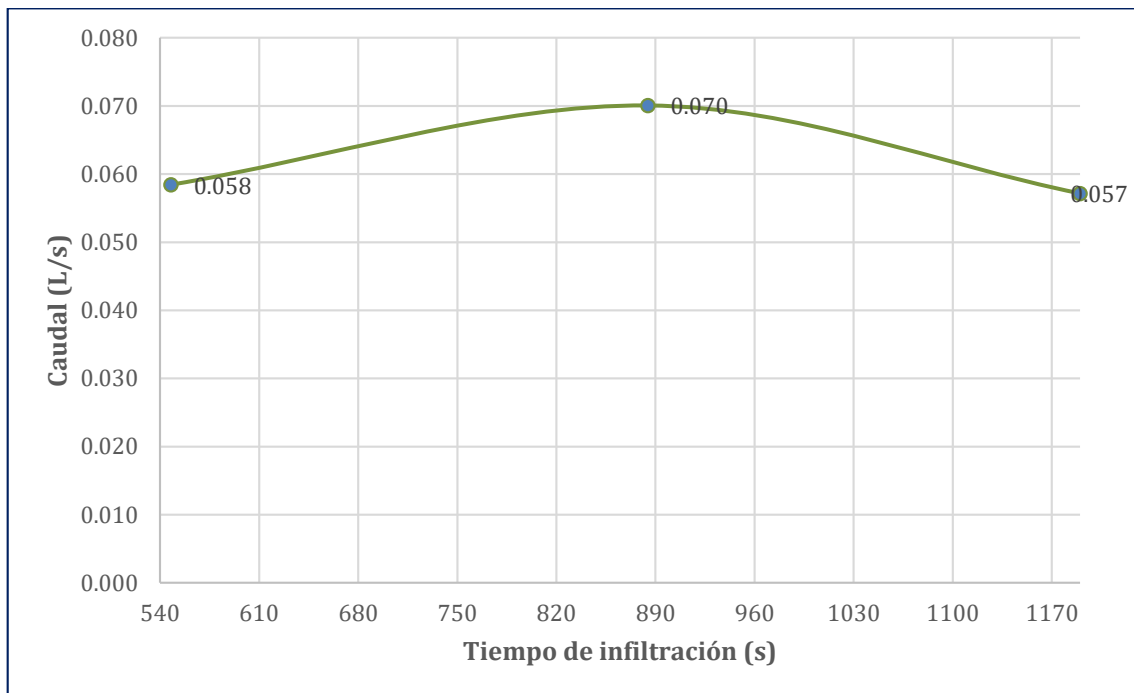


Figura 11
Caudal de la configuración 5: Grava/ Gravilla/Arena.

El caudal del primer ensayo fue de 0,058 L/s, el más alto entre todas las configuraciones. Esto refleja la alta capacidad de infiltración inicial de la grava y la gravilla en las capas superiores. El ensayo 2 con un caudal de 0,070 L/s, el sistema mostró una ligera mejora, lo que indica que las capas superiores aún tenían suficiente capacidad de infiltración para manejar el flujo y el ensayo 3 disminuyó a 0,0572 L/s, reflejando la saturación de la arena en la capa inferior.

Tabla 12
Caudal de la configuración 6: Gravilla/Grava/Arena

Configuración: Gravilla/Grava/Arena					
Ensayo	Volumen inicial (L)	Volumen final (L)	Volumen infiltrado (L)	Tiempo de infiltración (s)	Caudal (L/s)
1	110	66	44	498,12	0,088
2	212	141	71	881,48	0,081
3	308,5	197	111,5	1 179,53	0,095

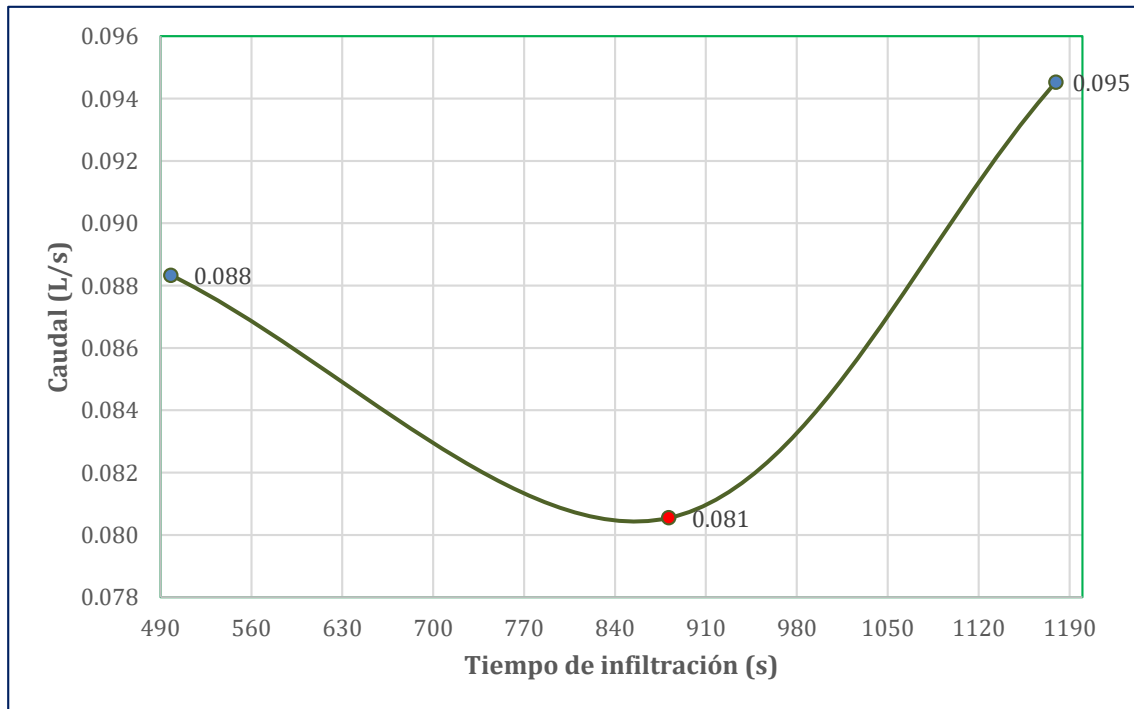


Figura 12
Caudal de la configuración 6: Gravilla/Grava/Arena.

Interpretación

El ensayo 1 presentó un caudal de 0,088 L/s, destacándose como el valor más alto en este ensayo. Esto se debe a la alta permeabilidad de la gravilla y la grava en las capas superiores. El ensayo 2, un caudal de 0,081 L/s, el sistema mostró una leve reducción en el caudal, pero se mantuvo eficiente gracias a las propiedades de las capas superiores y el ensayo 3 disminuyó a 0,095 L/s, mostrando una capacidad sostenida para manejar el flujo incluso en condiciones prolongadas.

Para complementar este análisis, también se evaluó la velocidad de infiltración en cada configuración mediante la siguiente expresión:

$$V = \frac{d}{t}$$

Donde:

V: velocidad de infiltración (cm/s).

d: espesor total de las capas (cm).

t: tiempo total de infiltración (s).

A continuación, se presentan los resultados de las velocidades para cada configuración:

Tabla 13
velocidad de la configuración 1: Gravilla/Arena/Grava

Configuración: Gravilla/Arena/Grava				
Ensayo	Espesor total (cm)	Tiempo de infiltración (s)	Velocidad (cm/s)	
1	30	641,99	0,0467	
2	30	987,83	0,0304	
3	30	1 214,42	0,0247	

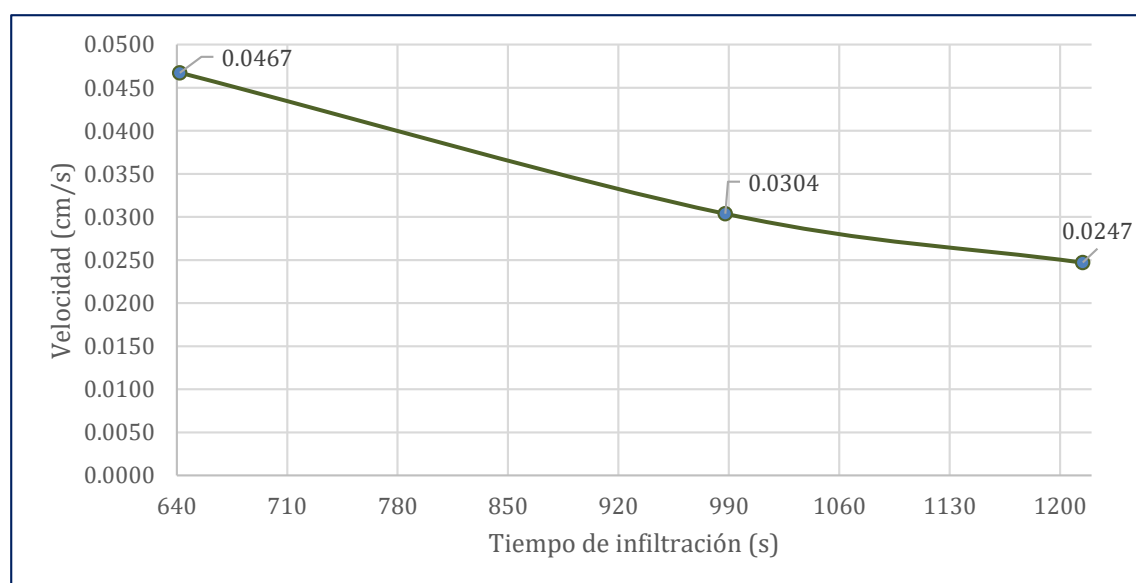


Figura 13
velocidad de la configuración 1: Gravilla/Arena/Grava.

Interpretación:

En esta configuración, la velocidad de infiltración promedio disminuyó progresivamente a medida que avanzaron los ensayos. En el primer ensayo, la velocidad fue de 0,0467 cm/s, lo que demuestra una infiltración eficiente inicial debido a la baja saturación del sistema. En el segundo ensayo, la velocidad descendió a 0,0304 cm/s, probablemente como resultado de la saturación parcial de la arena, que actúa como una barrera para el flujo de agua. Finalmente, en el tercer ensayo, la velocidad se redujo aún más a 0,0247 cm/s, indicando que el sistema alcanzó un estado cercano a la saturación completa. Esto resalta cómo la presencia de arena en la capa intermedia limita la eficiencia del sistema en escenarios prolongados.

Tabla 14
Velocidad de la configuración 2: Arena/Gravilla/Grava

Configuración: Arena/Gravilla/Grava				
Ensayo	Espesor total (cm)	Tiempo de infiltración (s)	Velocidad (cm/s)	
1	30	575,86	0,0521	
2	30	926,39	0,0324	
3	30	1 324,18	0,0227	

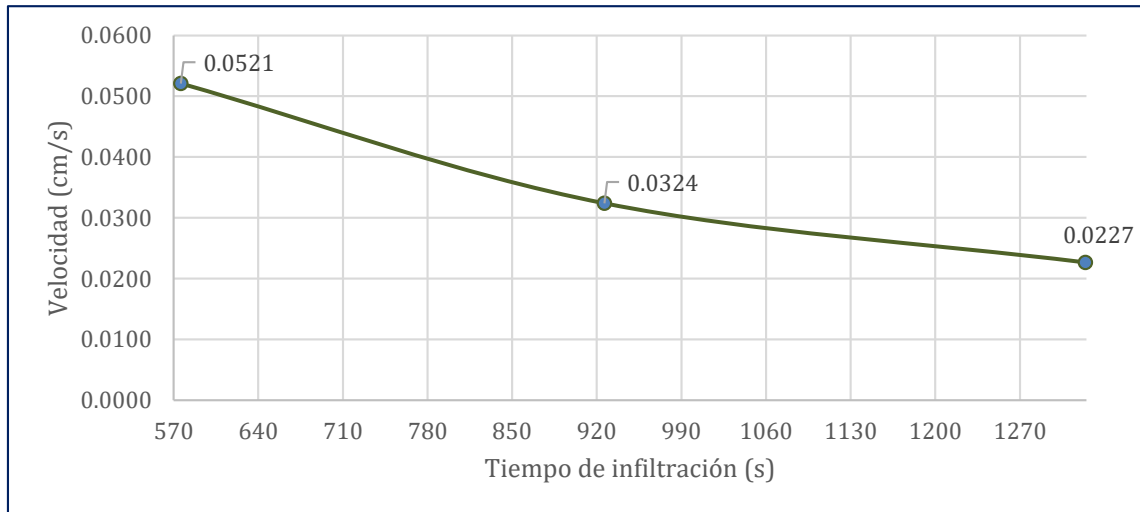


Figura 14
Velocidad de la configuración 2: Arena/Gravilla/Grava.

Interpretación

La disposición de arena como capa superior resultó en velocidades de infiltración relativamente bajas desde el inicio. En el primer ensayo, la velocidad fue de 0,0521 cm/s, mostrando un desempeño moderado. Sin embargo, en el segundo ensayo, la velocidad disminuyó a 0,0324 cm/s, evidenciando la saturación progresiva de la arena en la capa superior, que obstaculiza el flujo hacia las capas inferiores. En el tercer ensayo, la velocidad se redujo aún más a 0,0227 cm/s, reflejando que el sistema no pudo mantener un flujo eficiente debido a la saturación acumulada.

Tabla 15
Velocidad de la configuración 3: Arena/Grava/Gravilla

Configuración: Arena/Grava/Gravilla			
Ensayo	Espesor total (cm)	Tiempo de infiltración (s)	Velocidad (cm/s)
1	30	648,74	0,0462
2	30	944,05	0,0318
3	30	1 244,73	0,0241

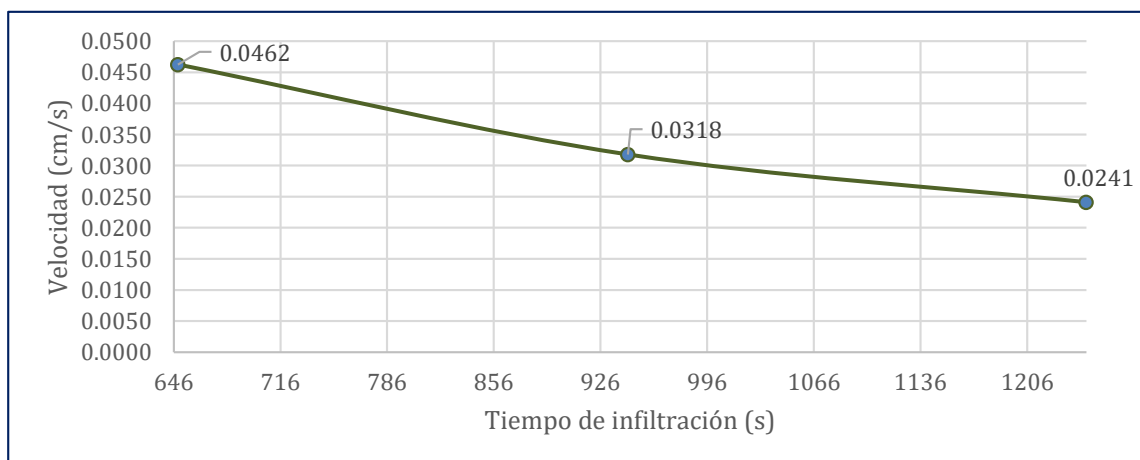


Figura 15
Velocidad de la configuración 3: Arena/Grava/Gravilla.

Esta configuración mostró velocidades iniciales bajas debido a la presencia de arena como capa superior y grava en la capa intermedia, lo que ralentizó el flujo. En el primer ensayo, la velocidad fue de 0,0462 cm/s, disminuyendo en el segundo ensayo a 0,0318 cm/s por la saturación progresiva. En el tercer ensayo, la velocidad bajó a 0,0241 cm/s, confirmando que el sistema no logró manejar eficientemente la infiltración bajo condiciones continuas de flujo. La combinación de materiales en esta configuración resulta en una capacidad de infiltración limitada.

Tabla 16

Velocidad de la configuración 4: Grava/Arena/ Gravilla

Configuración: Grava/Arena/Gravilla			
Ensayo	Espesor total (cm)	Tiempo de infiltración (s)	Velocidad (cm/s)
1	30	566,74	0,0529
2	30	910,55	0,0329
3	30	1 262,22	0,0238

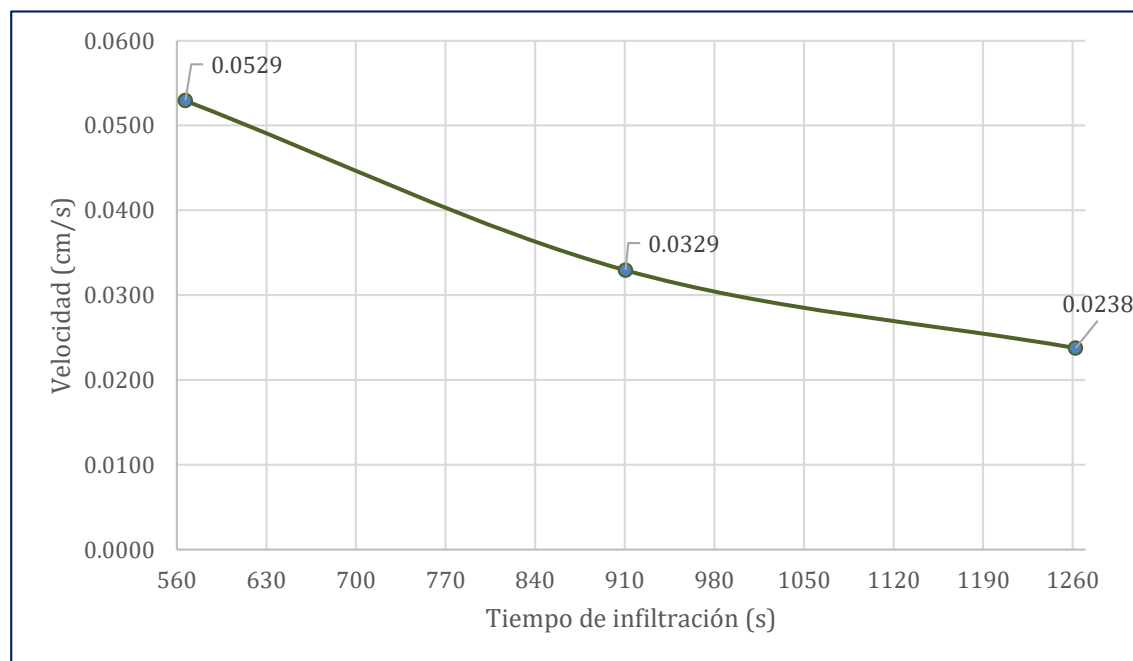


Figura 16

Velocidad de la configuración 4: Grava/Arena/ Gravilla.

La disposición de grava en la capa superior permitió un buen desempeño inicial, con una velocidad de infiltración promedio de 0,0529 cm/s en el primer ensayo. Sin embargo, la presencia de arena como capa intermedia redujo progresivamente la velocidad, alcanzando 0,0329 cm/s en el segundo ensayo y 0,0238 cm/s en el tercero. Esto indica que, aunque la grava en la capa superior mejora la infiltración inicial, la saturación de la arena intermedia limita la eficiencia del sistema en condiciones prolongadas. A pesar de esto, esta configuración mostró un desempeño relativamente consistente.

Tabla 17
Velocidad de la configuración 5: Grava/Gravilla/Arena

Configuración: Grava/Gravilla/Arena			
Ensayo	Espesor total (cm)	Tiempo de infiltración (s)	Velocidad (cm/s)
1	30	547,68	0,0548
2	30	884,6	0,0339
3	30	1 189,85	0,0252

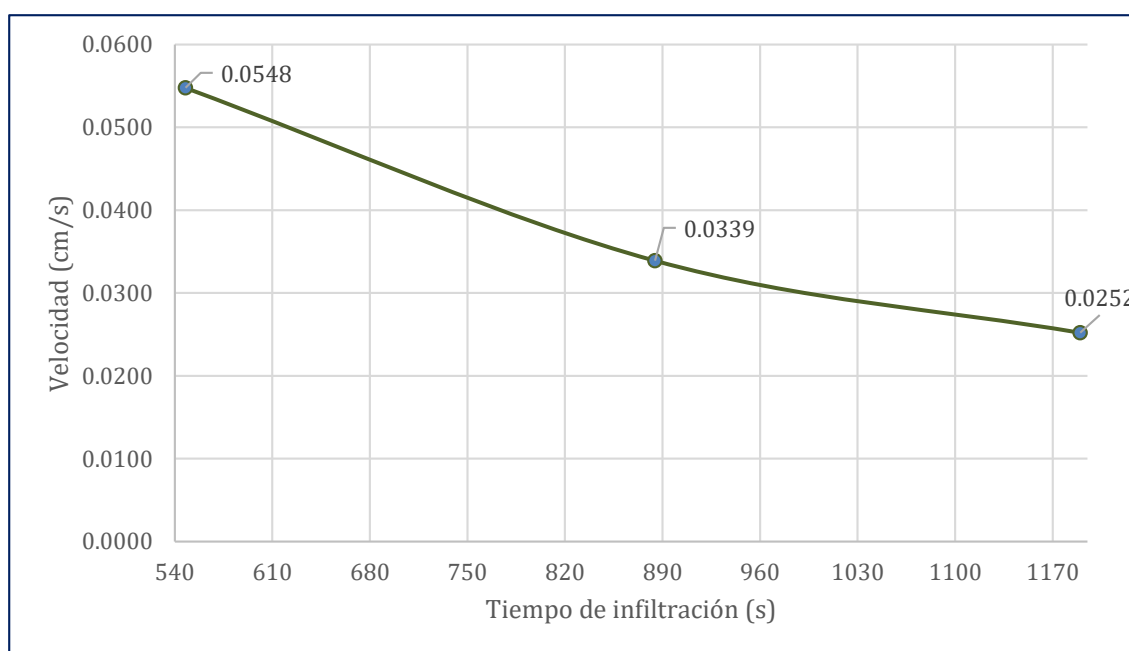


Figura 17
Velocidad de la configuración 5: Grava/Gravilla/Arena.

Esta configuración presentó las velocidades de infiltración más altas entre todas las configuraciones. En el primer ensayo, la velocidad fue de 0,0548 cm/s, lo que destaca la eficiencia de las capas superiores de grava y gravilla para permitir el paso del agua. En el segundo ensayo, la velocidad se mantuvo relativamente alta en 0,0339 cm/s, mostrando que el sistema puede manejar flujos moderados sin saturarse rápidamente. Incluso en el tercer ensayo, con una velocidad de 0,0252 cm/s, esta configuración superó a la mayoría de las otras, evidenciando su capacidad para manejar la infiltración de manera eficiente bajo diversas condiciones.

Tabla 18
Velocidad de la configuración 6: Gravilla/Grava/Arena

Configuración: Gravilla/Grava/Arena			
Ensayo	Espesor total (cm)	Tiempo de infiltración (s)	Velocidad (cm/s)
1	30	498,12	0,0602
2	30	881,48	0,0340
3	30	1 179,53	0,0254

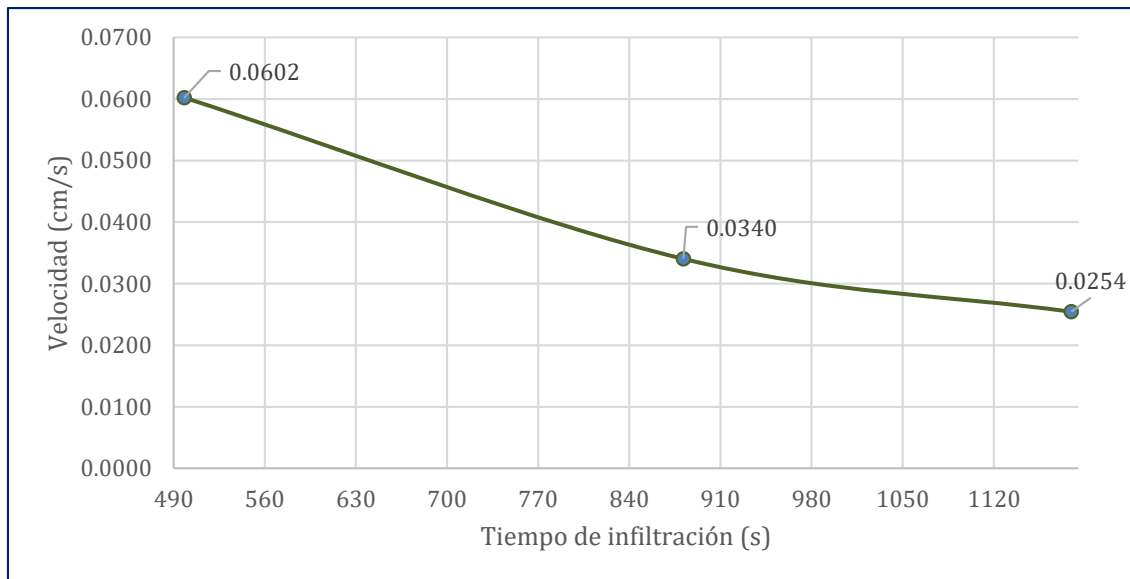


Figura 18

Velocidad de la configuración 6: Gravilla/Grava/Arena.

La disposición de gravilla y grava en las capas superiores hizo que esta configuración alcanzara velocidades de infiltración consistentemente altas. En el primer ensayo, la velocidad fue de 0,0602 cm/s, la más alta entre todas las configuraciones evaluadas. En el segundo ensayo, la velocidad se redujo a 0,0340 cm/s, pero siguió siendo competitiva. En el tercer ensayo, la velocidad disminuyó a 0,0254 cm/s, mostrando una ligera saturación, pero manteniendo un desempeño superior al de otras configuraciones. Esto sugiere que esta disposición es altamente eficiente para manejar eventos de infiltración prolongados.

4.3. Resultado específico 3: Eficiencia de la gestión de agua de lluvia en un sistema urbano de drenaje sostenible para zanjas de infiltración

Se analizó la eficiencia del sistema en términos del porcentaje de agua infiltrada con respecto al volumen total captado. Esto permitió evaluar la capacidad del SUDS para reducir la escorrentía superficial y mejorar la infiltración de agua en el suelo.

La eficiencia del sistema se calculó mediante la fórmula:

$$\% \text{ Eficiencia de infiltración} = \frac{\text{Volúmen}_{\text{inicial}} - \text{Volúmen}_{\text{final}}}{\text{Volúmen}_{\text{inicial}}} \times 100$$

Adicionalmente, se compararon los resultados obtenidos frente a estándares nacionales e internacionales para zanjas de infiltración. Se realizaron simulaciones computacionales en diferentes escenarios de lluvia (precipitaciones ligeras, moderadas y fuertes), evaluando el desempeño del sistema bajo diversas condiciones climáticas.

A continuación, se presentan los resultados de las eficiencias para cada una de las configuraciones:

Tabla 19
Eficiencia de la configuración 1: Gravilla/Arena/Grava

Configuración: Gravilla/Arena/Grava			
Ensayo	Volumen inicial	Volumen final	Eficiencia
1	55	28	49,09%
2	60	38,5	35,83%
3	49,5	33,6	32,12%

La eficiencia de esta configuración mostró una tendencia decreciente en los tres ensayos. En el primer ensayo, se alcanzó una eficiencia del 49,09%, quedando ligeramente por debajo del estándar mínimo aceptable. En el segundo ensayo, la eficiencia descendió a 35,83%, reflejando una disminución en la capacidad del sistema para infiltrarse debido a la saturación progresiva de la capa de arena. En el tercer ensayo, la eficiencia cayó a 32,12%, lo que confirma que esta disposición no es capaz de mantener un desempeño adecuado en eventos de lluvia prolongados. Esto resalta la limitación de la arena en la capa intermedia, que ralentiza el flujo hacia las capas inferiores.

Tabla 20
Eficiencia de la configuración 2: Arena/Gravilla/Grava

Configuración: Arena/Gravilla/Grava			
Ensayo	Volumen inicial	Volumen final	Eficiencia
1	100	79	21%
2	200	180	10%
3	301	257	14,62%

En esta configuración, la eficiencia inicial fue de 21,00%, significativamente por debajo de los estándares requeridos. Este valor refleja la baja capacidad de infiltración de la arena en la capa superior, que genera una barrera inicial para el flujo de agua. En el segundo ensayo, la eficiencia disminuyó aún más, alcanzando un 10,00%, lo que sugiere una saturación temprana del sistema. Finalmente, en el tercer ensayo, la eficiencia fue de 14,62%, mostrando una ligera recuperación debido a la capacidad de la gravilla y la grava inferiores para manejar parte del flujo acumulado. Sin embargo, los valores obtenidos indican que esta configuración no es adecuada para cumplir con los estándares internacionales.

Tabla 21
Eficiencia de la configuración 3: Arena/Grava/Gravilla

Configuración: Arena/Grava/Gravilla			
Ensayo	Volumen inicial	Volumen final	Eficiencia
1	103	82	20,39%
2	211,5	187	11,58%
3	308,5	294	4,70%

Esta disposición también presentó eficiencias inferiores a los estándares mínimos. En el primer ensayo, la eficiencia fue de 20,39%, indicando una capacidad inicial limitada

para infiltrarse debido a la presencia de arena en la capa superior. En el segundo ensayo, la eficiencia descendió a 11,58%, evidenciando una saturación significativa en las capas superiores e intermedias. Finalmente, en el tercer ensayo, la eficiencia fue de apenas 4,70%, lo que refleja que el sistema alcanzó un estado de saturación completa. Estos resultados muestran que esta configuración es altamente ineficiente para manejar el agua de lluvia.

Tabla 22

Eficiencia de la configuración 4: Grava/Arena/ Gravilla.

Configuración: Grava/Arena/Gravilla			
Ensayo	Volumen inicial	Volumen final	Eficiencia
1	104,0	82,5	20,67%
2	206,5	180,0	12,83%
3	295,0	263,5	10,68%

Los resultados muestran que la eficiencia es baja en todos los ensayos, comenzando en 20,67% en el primer ensayo y disminuyendo a 12,83% y 10,68% en los ensayos posteriores. Esto indica que la disposición de grava como capa superior permite una infiltración inicial moderada, pero la arena como capa intermedia rápidamente se satura, lo que reduce drásticamente la capacidad del sistema para manejar volúmenes significativos de agua de lluvia. Esta configuración no cumple con los estándares internacionales, ya que su eficiencia nunca supera el 50%.

Tabla 23

Eficiencia de la configuración 5: Grava/Gravilla/Arena.

Configuración: Grava/Gravilla/Arena			
Ensayo	Volumen inicial	Volumen final	Eficiencia
1	105	73	30,48%
2	208	146	29,81%
3	305	237	22,30%

Esta configuración mostró mejores resultados, con una eficiencia inicial de 30,48%, seguida de 29,81% y 22,30% en los ensayos posteriores. Aunque no alcanza el estándar mínimo del 50%, el uso de grava y gravilla en las capas superiores permite una mayor capacidad de infiltración en comparación con la configuración anterior. Sin embargo, la presencia de arena como capa inferior limita la infiltración a largo plazo, lo que provoca una disminución de la eficiencia en eventos de lluvia prolongados.

Tabla 24

Eficiencia de la configuración 6: Gravilla/Grava/Arena.

Configuración: Gravilla/Grava/Arena			
Ensayo	Volumen inicial	Volumen final	Eficiencia
1	110	66	40%
2	212	141	33,49%
3	308.5	197	36,14%

Esta disposición presentó la mejor eficiencia entre todas las configuraciones evaluadas. En el primer ensayo, alcanzó el 40%, seguido de 33,49% y 36,14% en los ensayos posteriores. Aunque estas cifras todavía están por debajo del estándar internacional, se observa que la disposición de gravilla y grava en las capas superiores mejora significativamente la capacidad del sistema para manejar el agua de lluvia. Este diseño es prometedor y podría optimizarse incorporando ajustes en los espesores de las capas o añadiendo áreas de almacenamiento temporal para superar el umbral del 50%.

4.3.1. Simulación computacional

Tabla 25

Resultado de las simulaciones

Configuración	Escenario de Lluvia	Intensidad (mm/h)	Eficiencia (%)	Observaciones
Gravilla/Arena/Grava	Lluvias ligeras	10	52%	Alta capacidad de infiltración, sin saturación.
	Lluvias moderadas	30	38%	Saturación parcial en capas superiores.
	Lluvias intensas	50	18%	Saturación total, generación de escorrentía.
Arena/Gravilla/Grava	Lluvias ligeras	10	48%	Capacidad moderada, ligera saturación.
	Lluvias moderadas	30	35%	Saturación parcial en capas superiores.
	Lluvias intensas	50	15%	Baja eficiencia en lluvias fuertes.
Arena/Grava/Gravilla	Lluvias ligeras	10	45%	Infiltración aceptable, tendencia a saturarse.
	Lluvias moderadas	30	32%	Saturación parcial, descenso en eficiencia.
	Lluvias intensas	50	12%	Saturación total con escorrentía.
Grava/Arena/Gravilla	Lluvias ligeras	10	55%	La mejor eficiencia en lluvias ligeras.
	Lluvias moderadas	30	42%	Buen desempeño, saturación moderada.
	Lluvias intensas	50	22%	Capacidad limitada en lluvias fuertes.
Grava/Gravilla/Arena	Lluvias ligeras	10	53%	Alta capacidad sin saturación.
	Lluvias moderadas	30	39%	Saturación parcial en capas medias.
	Lluvias intensas	50	20%	Saturación rápida con generación de flujo superficial.
Gravilla/Grava/Arena	Lluvias ligeras	10	57%	La configuración más eficiente en lluvias ligeras.
	Lluvias moderadas	30	45%	Mejor desempeño en lluvias moderadas.
	Lluvias intensas	50	25%	Resistencia relativa a saturación total.

4.3.2. Configuración 1: Gravilla/Arena/Grava

En lluvias ligeras, esta configuración presentó una eficiencia del 52%, indicando un desempeño aceptable, con alta capacidad de infiltración y sin signos de saturación significativa. Sin embargo, en lluvias moderadas, la eficiencia disminuyó al 38%, lo que sugiere una saturación parcial de las capas superiores, especialmente la arena, que ralentizó el flujo hacia las capas inferiores. Finalmente, en lluvias intensas, la eficiencia se redujo al 18%, evidenciando la saturación total del sistema y la generación de escorrentía superficial. Estos resultados muestran que esta configuración es adecuada únicamente para lluvias ligeras, pero su capacidad es insuficiente para manejar eventos más intensos.

4.3.3. Configuración 2: Arena/Gravilla/Grava

Esta configuración presentó una eficiencia del 48% en lluvias ligeras, lo que refleja una capacidad moderada para infiltrar el agua, aunque con ligeros signos de saturación en la capa superior de arena. En lluvias moderadas, la eficiencia disminuyó al 35%, indicando que la arena en la capa superior limita significativamente la infiltración a medida que se satura. En lluvias intensas, la eficiencia cayó al 15%, mostrando que el sistema no puede manejar eficientemente grandes volúmenes de agua y que la generación de escorrentía es inevitable. Estos resultados confirman que la disposición de arena en la capa superior reduce la capacidad del sistema, especialmente en lluvias más intensas.

4.3.4. Configuración 3: Arena/Grava/Gravilla

En el caso de lluvias ligeras, esta configuración alcanzó una eficiencia del 45%, mostrando un desempeño aceptable inicial, aunque con una tendencia clara a saturarse rápidamente debido a la arena en la capa superior. En lluvias moderadas, la eficiencia se redujo al 32%, reflejando que tanto la arena como la grava en las capas superiores afectan la capacidad de infiltración al saturarse parcialmente. En lluvias intensas, la eficiencia disminuyó al 12%, indicando que el sistema alcanzó la saturación total, lo que resultó en escorrentía superficial significativa. Esta configuración es la menos eficiente para manejar lluvias prolongadas y de alta intensidad.

4.3.5. Configuración 4: Grava/Arena/Gravilla

Esta configuración mostró un buen desempeño inicial en lluvias ligeras, con una eficiencia del 55%, la más alta entre todas las configuraciones para este escenario. La grava en la capa superior permitió una infiltración rápida y eficiente, sin signos de saturación significativa. Sin embargo, en lluvias moderadas, la eficiencia descendió al 42%, lo que indica una saturación parcial de la arena en la capa intermedia, afectando

la capacidad del sistema. En lluvias intensas, la eficiencia fue del 22%, lo que evidencia que el sistema pierde efectividad bajo flujos prolongados y genera escorrentía. Aunque presenta buenos resultados en lluvias ligeras, su capacidad se reduce considerablemente en eventos más extremos.

4.3.6. Configuración 5: Grava/Gravilla/Arena

En lluvias ligeras, esta configuración alcanzó una eficiencia del 53%, destacándose por su alta capacidad para manejar el agua sin saturación inicial. La combinación de grava y gravilla en las capas superiores favoreció una infiltración eficiente. En lluvias moderadas, la eficiencia fue del 39%, mostrando una saturación parcial en las capas medias, pero manteniendo un desempeño aceptable. En lluvias intensas, la eficiencia se redujo al 20%, reflejando una capacidad limitada para manejar grandes volúmenes de agua debido a la saturación de la arena en la capa inferior. Aunque esta configuración es eficiente en escenarios de baja y moderada intensidad, no logra superar los estándares en lluvias intensas.

4.3.7. Configuración 6: Gravilla/Grava/Arena

Esta configuración presentó el mejor desempeño general en todos los escenarios de lluvia. En lluvias ligeras, alcanzó una eficiencia del 57%, destacándose como la configuración más eficiente. La disposición de gravilla y grava en las capas superiores permitió una rápida infiltración del agua, sin saturación inicial. En lluvias moderadas, la eficiencia fue del 45%, mostrando la mejor capacidad entre todas las configuraciones para manejar flujos intermedios. En lluvias intensas, la eficiencia fue del 25%, reflejando una resistencia relativa a la saturación total, aunque todavía con generación de escorrentía superficial. Este diseño es el más prometedor para cumplir con los estándares internacionales, especialmente con ajustes en las capas inferiores para manejar eventos más intensos.

4.4. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en esta investigación reflejan una clara influencia de la configuración de capas en la eficiencia de infiltración de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). La configuración Gravilla/Grava/Arena demostró ser la más eficiente en la gestión del agua de lluvia, con una eficiencia del 57% en lluvias ligeras y 45% en lluvias moderadas, resultados que concuerdan con estudios previos sobre el desempeño de SUDS en distintas regiones.

Imani et al., (2024) evaluaron el impacto del mantenimiento en el rendimiento hidráulico de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS) en condiciones controladas de

laboratorio. En su estudio, se observó que la acumulación de hojas y sedimentos reduce de manera significativa la capacidad de infiltración, por lo cual se destaca la importancia de indicadores como tiempo de infiltración y la respuesta hidráulica general para evaluar el desempeño de los SUDS. En este estudio, estos mismos parámetros fueron principales para comparar las distintas configuraciones y determinar cuál es la más óptima, lo que nos permitió reforzar la idea de que, más allá del diseño inicial, el desempeño de un SUDS depende en gran medida del estado de conservación de sus capas filtrantes.

Raimondi et al., (2023) modelaron los SUDS considerando la probabilidad de escorrentía y almacenamiento residual, destacando que las tasas de salida y el régimen de lluvia afectan la eficiencia del drenaje. Los resultados de este estudio evidenciaron que las configuraciones con capas superiores de baja permeabilidad experimentaron una acumulación de agua que afectó su rendimiento en eventos de lluvias intensas. Este hallazgo es consistente con lo observado en la configuración Arena/Gravilla/Grava, que presentó una eficiencia baja en precipitaciones moderadas y fuertes, sugiriendo que este diseño puede no ser el más adecuado para zonas con precipitaciones recurrentes.

Yang & Zhang, (2021) destacaron que las estrategias verdes mejoraron la calidad del agua y la sostenibilidad a largo plazo, mientras que las estrategias grises fueron más efectivas en la mitigación de inundaciones. La configuración Gravilla/Grava/Arena en este estudio, al combinar materiales de alta permeabilidad con estructura granular, refleja un enfoque que equilibra ambos criterios. Sin embargo, a diferencia de los hallazgos de Yang & Zhang, los resultados muestran que incluso las configuraciones más eficientes podrían beneficiarse de la implementación de elementos verdes adicionales, como cubiertas vegetadas o zonas de almacenamiento temporal.

Archer et al., (2020) compararon la infiltración en pavimentos permeables y áreas verdes, observando tasas de infiltración de 1,925 mm/h en los pavimentos frente a 56 mm/h en las áreas verdes. En este estudio, las configuraciones más eficientes presentaron tasas de infiltración similares a los pavimentos permeables, confirmando que una correcta disposición de materiales puede alcanzar desempeños comparables a sistemas construidos específicamente para ello.

A nivel nacional, Vásquez y Valdivia, (2023) identificaron problemas de saturación en redes de alcantarillado en Huancayo y propusieron SUDS como solución. En este contexto, las configuraciones menos eficientes de este estudio, como Arena/Gravilla/Grava, podrían no ser recomendables para implementaciones en zonas

urbanas propensas a saturación, resaltando la necesidad de diseñar sistemas adecuados según las condiciones climáticas y urbanas específicas.

Por otro lado, López y Villavicencio, (2021) propusieron la instalación de cunetas verdes como solución a la reducción de infiltración por pavimentación. En este estudio, la configuración Gravilla/Grava/Arena logró una eficiencia similar a la esperada en soluciones naturales, lo que refuerza la viabilidad de implementar SUDS con combinaciones de materiales optimizadas para mejorar la infiltración en zonas urbanas.

Los resultados de esta investigación concuerdan en gran medida con estudios previos, destacando que los SUDS con capas superiores de alta permeabilidad son los más eficientes en la infiltración de agua de lluvia. No obstante, se identificaron oportunidades de mejora en la capacidad de almacenamiento y adaptabilidad a eventos de precipitación extrema, lo que podría abordarse con diseños optimizados y combinaciones de infraestructura verde y gris.

CONCLUSIONES

La eficiencia de infiltración de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) está fuertemente influenciada por la composición y disposición de sus capas. Las configuraciones con materiales de alta permeabilidad como gravilla/grava/arena son más eficaces en el manejo del agua de lluvia, destacándose como una solución clave en el diseño de SUDS.

La elección adecuada de los materiales en la capa superior es fundamental para evitar la saturación prematura del sistema y optimizar su rendimiento en la gestión de agua de lluvia.

El análisis del caudal y la velocidad de infiltración revela una relación directa entre la disminución de estos parámetros y la saturación del sistema. Este hallazgo subraya la importancia de diseñar sistemas que mantengan una eficiencia estable durante eventos prolongados de precipitación, asegurando un drenaje adecuado a lo largo del tiempo.

Los resultados muestran que las configuraciones que incluyen arena en la capa superior limitan la capacidad de infiltración, lo que acelera la saturación, un factor que debe ser considerado al evaluar el caudal y la velocidad de infiltración en los SUDS.

El estudio muestra que solo una de las configuraciones evaluadas se aproxima al estándar internacional de eficiencia mínima del 50% en sistemas de infiltración, lo que pone de manifiesto la necesidad de ajustar el diseño de los SUDS para mejorar su desempeño durante eventos de lluvias intensas.

La eficiencia de la gestión del agua de lluvia depende de un diseño que contemple las características específicas del suelo y las condiciones climáticas locales, lo que refuerza la importancia de personalizar cada sistema de drenaje sostenible según la región de implementación.

RECOMENDACIONES

Se recomienda optimizar el diseño de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) con materiales de alta permeabilidad en las capas superiores para mejorar la infiltración y evitar la saturación prematura.

Se sugiere implementar geotextiles en capas intermedias para mejorar la distribución del agua y evitar la compactación del suelo, prolongando la eficiencia hidráulica del sistema.

Se recomienda evaluar la durabilidad y mantenimiento de los SUDS a largo plazo, considerando sedimentación, contaminantes y variabilidad climática.

Se sugiere ajustar la granulometría de los materiales y combinar tecnologías complementarias, como reservorios de almacenamiento, para optimizar la capacidad de retención ante precipitaciones intensas.

Se recomienda fomentar la investigación en infraestructura verde y gris para mejorar la gestión del agua en zonas urbanas y evaluar la modificación de normativas locales para su implementación obligatoria.

Se sugiere capacitar a profesionales y promover la participación ciudadana en el mantenimiento de los SUDS, a través de programas de sensibilización y educación ambiental.

Se recomienda monitorear y evaluar continuamente el desempeño de los SUDS en diferentes condiciones climáticas y geográficas para mejorar su eficiencia según las necesidades de cada región.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Autodesk. (2025, septiembre 17). *The Role of Ponds and Infiltration Basins in Sustainable Drainage Design*. Recuperado de <https://www.autodesk.com/blogs/water/2025/09/17/the-role-of-ponds-and-infiltration-basins-in-sustainable-drainage-design>
- Aldaz Martínez, A. R. (2024). Análisis de las políticas de gestión de riesgos y planes de uso de suelo, para mejorar la respuesta y reducir los impactos generados por aluviones en las zonas susceptibles del Distrito Metropolitano de Quito en el periodo 2012-2022 [Tesis de maestría, Universidad presumida]. Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/10469/21266>.
- Archer, N. A. L., Bell, R. A., Butcher, A. S., & Bricker, S. H. (2020). Infiltration efficiency and subsurface water processes of a sustainable drainage system and consequences to flood management. *Journal of Flood Risk Management*, 13(3), e12629. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12629>
- Bertrand-Krajewski, J. L., Clemens, F. H. L. R., & Lepot, M. (2021). *Metrology in urban drainage and stormwater management plug and pray*. IWA Publishing.
- Blöschl, G., Kiss, A., Viglione, A., & Parajka, J. (2022). *Multiple drivers of global flood hazard: Interactions of precipitation, soil moisture, and land use*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(24), 6163–6179. <https://doi.org/10.5194/hess-26-6163-2022>
- Cansian, A. R., Guzmán, D. A., Rosa, A., & de Toledo Machado, J. (2025). *Nature-Based Solutions for Urban Drainage: A Systematic Review of Sizing and Monitoring Methods*. *Water*, 17(17), 2524. <https://www.mdpi.com/2073-4441/17/17/2524>
- Chavez, S. P., Bowers, B., Tao, W.-K., Li, X., Zhang, Y., & Yuter, S. E. (2023). *Aerosol indirect effects on orographic clouds and precipitation*. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1025266. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1025266>
- Climate Central. (2024). *Climate change and inland flooding*. Climate Matters Report. Recuperado de <https://www.climatecentral.org/climate-matters/climate-change-and-inland-flooding>
- Dierkes, C., et al. (2024). *Converting infiltration swales to sustainable urban drainage systems can improve water management and biodiversity*. *Frontiers in*

- Environmental Science, 12, 1524239.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1524239>
- Encyclopaedia Britannica. (2025). *Drainage basin*. Recuperado de <https://www.britannica.com/science/drainage-basin>
- Giannakoudakis, D. A., Meili, L., & Anastopoulos, I. (2023). *Novel materials for environmental remediation applications: adsorption and beyond*. Elsevier. <https://goo.su/zNTeY>
- Gil, M., Jouravlev, A., & Saravia Matus, S. (2021). Reflexiones sobre la gestión del agua en América Latina y el Caribe. Textos seleccionados 2002-2020. <https://hdl.handle.net/11362/46792>.
- Imani, M., Brambleby, R., & Maktabdar Oghaz, M. (2024). *Health monitoring: A pathway to improved sustainable drainage system maintenance*. British Geological Survey. <https://doi.org/10.2166/bgs.2024.035>
- John, R. (2024). *Understanding the Hydrological Cycle: Earth's Vital Water System*. British Journal of Research, 11(6), 60. <https://doi.org/10.35841/2394-3718-11.6.60>
- Khodadad, M., Aguilar-Barajas, I., & Khan, A. Z. (2023). *Green Infrastructure for Urban Flood Resilience: A Review of Recent Literature on Bibliometrics, Methodologies, and Typologies*. Water, 15, 523. <https://doi.org/10.3390/w15030523>
- Kurup, B. M., Boopendranath, M. R., Harikrishnan, M., & Shibu, A. V. (2022). Impact of climate change on hydrological cycle, ecosystem, fisheries and food security. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003299769>
- Li, J., & Burian, S. J. (2022). *Studying the impact of impervious land cover on flooding in urban areas*. Civil Engineering Magazine. (Nota técnica, doi:10.1061/JSWBAY.0000978)
- Larroza, M. B., Martínez Quiñones, M. A., & Quenardelle, S. A. (2024). Optimización del sistema pluvial con métodos no destructivos e implementación de un sistema de captación de agua de lluvia-campus UNNE-Resistencia. <http://repositorio.unne.edu.ar/handle/123456789/53128>.
- López Amaro, J. L., y Villavicencio Cuya, R. L. (2021). Sistema urbano de drenaje sostenible para evitar inundaciones de origen pluvial mejorando áreas verdes, cruce Av. Mateo Pumacahua – Av. Separadora Industrial, Distrito Villa El

- Salvador [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. <http://hdl.handle.net/10757/657404>
- Mancilla Soliz, B. I. W. J. (2021). Propuesta metodológica para la evaluación de riesgos ambientales en proyectos viales tramo: Cotapata - Santa Barbara - La Paz. <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/33351>.
- Medina, L., Madurga Lopez, I. M., Penel, C., Higuera Florez, J., Pacillo, G., Läderach, P. R. D., Hellin, J., Sieber, S., & Bonatti, M. (2024). Voces comunitarias sobre clima, paz y seguridad: Guatemala. <https://hdl.handle.net/10568/139426>.
- Monachese, A. P., Gómez-Villarino, M. T., López-Santiago, J., Sanz, E., Almeida-Ñauñay, A. F., & Zubezu, S. (2025). *Challenges and Innovations in Urban Drainage Systems: Sustainable Drainage Systems Focus*. *Water*, 17(1), 76. <https://doi.org/10.3390/w17010076>
- Monachese, A. P., Morales, A. J., & Ferreira, L. (2024). *Challenges and Innovations in Urban Drainage Systems*. *Water*, 17(1), 76. <https://www.mdpi.com/2073-4441/17/1/76>
- Montini, G., Marchioni, L., & Palla, A. (2022). *Modelling Infiltration Systems' Performance for Efficient, Sustainable or Circular Urban Water Drainage*. *Water*, 14(17), 2620. <https://doi.org/10.3390/w14172620>
- Muñoz Verdeza, V. M., & García Zuluaga, D. (2024). Diagnóstico hidroclimático del deprimido de bulevarías en la ciudad de Medellín. <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/6676>.
- Oswald, C., Kelleher, C., Ledford, S., Hopkins, K., Sytsma, A., Tetzlaff, D., Toran, L., & Voter, C. (2023). *Integrating urban water fluxes and moving beyond impervious surface cover: A review*. *Journal of Hydrology*, 618, Article 129188. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129188>
- Oroz Merino, L. A. (2021). Evaluación del sistema de drenaje pluvial de la urbanización Las Riveras con la norma OS.060 del Reglamento Nacional de Edificaciones, Cajamarca 2021 [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/29950>
- Öztürk, Ş., Yılmaz, K., Dinçer, A. E., et al. (2024). *Effect of urbanization on surface runoff and performance of green roofs and permeable pavement for mitigating urban*

floods. *Natural Hazards*, 120, 12375-12399. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06688-w>

Pandey, M., Gupta, A. K., & Oliveto, G. (2023). *River, sediment and hydrological extremes causes, impacts and management*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-99-4811-6>

Raimondi, A., Di Chiano, M. G., Marchioni, M., Sanfilippo, U., y Becciu, G. (2023). Modelado probabilístico de sistemas de drenaje urbano sostenible. *Urban Ecosystems*, 26, 493–502. <https://lc.cx/1aKvU0>

RockPave. (2025, abril 10). *The Role of Permeable Paving in Sustainable Drainage Systems*. Recuperado de <https://www.rockpave.com/the-role-of-permeable-paving-in-sustainable-drainage-systems>

Rodríguez-Rojas, M. I., Garrido-Jiménez, F. J., Abarca-Álvarez, F. J., & Vallecillos-Siles, M. R. (2024). *Advances in the integration of Sustainable Drainage Systems into urban planning: A case study*. *Sustainability*, 16, 2658. <https://doi.org/10.3390/su16072658>

Rüdisühli, S., Sprenger, M., Leutwyler, D., Schär, C., & Wernli, H. (2020). *Attribution of precipitation to cyclones and fronts over Europe in a kilometer-scale regional climate simulation*. *Weather and Climate Dynamics*, 1, 675–699. <https://doi.org/10.5194/wcd-1-675-2020>

Sun, N., Lu, G., & Fu, Y. (2024). *Microphysical characteristics of precipitation within convective overshooting over East China observed by GPM DPR and ERAS*. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24, 7123–7140. <https://doi.org/10.5194/acp-24-7123-2024>

Tota-Maharaj, K. (2025). *Sustainable Drainage Systems (SuDS) for Rainwater*. *ScienceDirect*. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772411525000163>

UK Government. (2025, julio 30). *National Standards for Sustainable Drainage Systems (SuDS)*. Recuperado de <https://www.gov.uk/government/publications/national-standards-for-sustainable-drainage-systems>

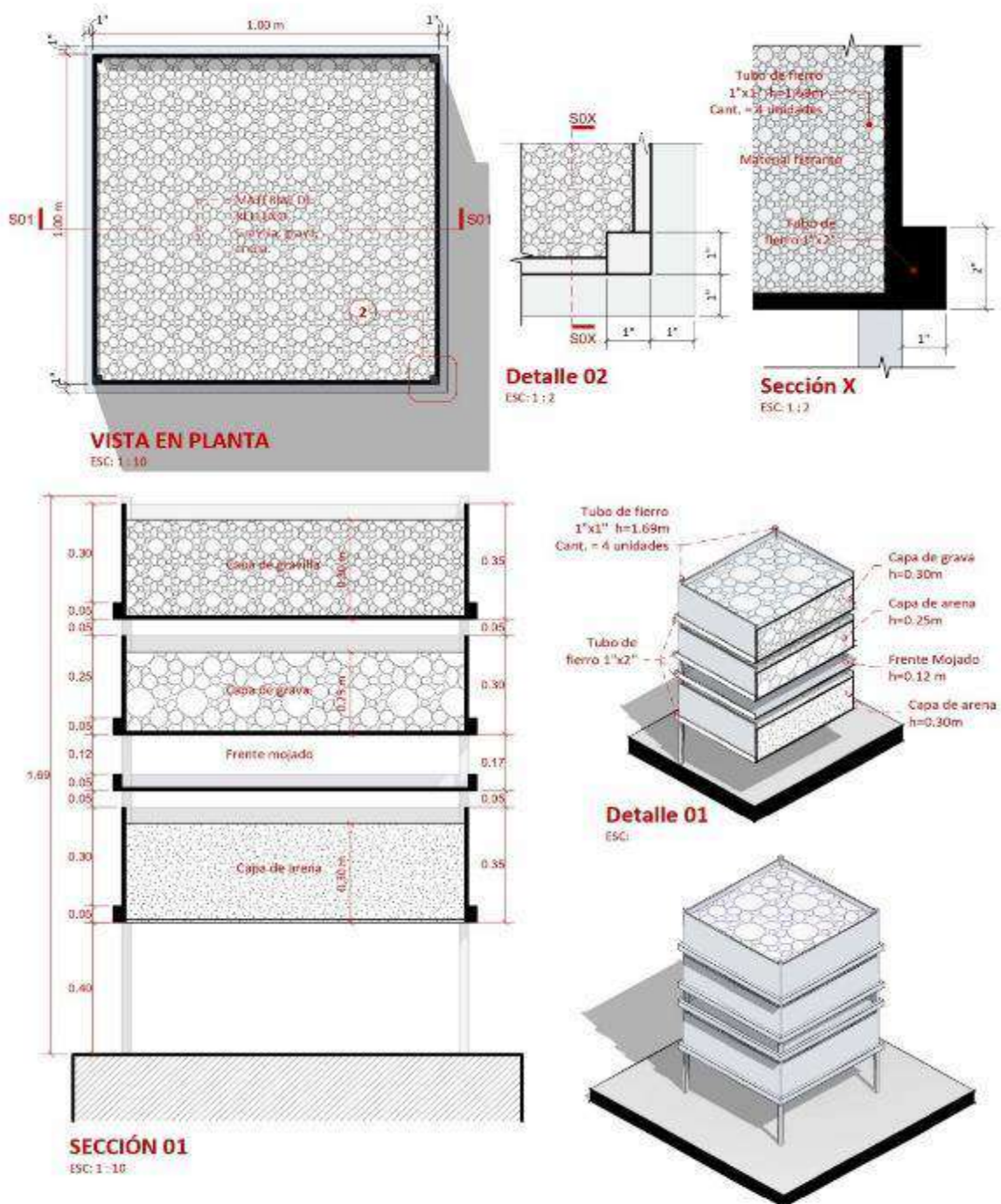
Vásquez Quispe, H. M., y Valdivia Moya, A. M. (2023). Diseño de un sistema urbano de drenaje sostenible en el distrito de Huancayo – Región de Junín con adaptación a escenarios climáticos y modificación de la norma técnica peruana CE.040

[Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú].
<https://goo.su/UpS7>

- Villegas Medina, W. A., & Moreno Moreno, D. F. (2024). Determinación de zonas en riesgo por remoción en masa en el área urbana del municipio de Quetame Cundinamarca, utilizando UAV. <http://hdl.handle.net/11349/39771>.
- Wang, X., & Liu, L. (2023). *The Impacts of Climate Change on the Hydrological Cycle and Water Resource Management*. *Water*, 15(13), 2342. <https://doi.org/10.3390/w15132342>
- Yang, W., & Zhang, J. (2021). Assessing the performance of gray and green strategies for sustainable urban drainage system development: A multi-criteria decision-making analysis. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126191. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126191>
- Zeleňáková, M., Hudáková, G., & Stec, A. (2020). *Rainwater infiltration in urban areas*. Springer. <https://goo.su/1PmA6o>
- Zhang, Y., Li, H., Chen, J., & Liu, X. (2024). *Influence of urban surfaces on stormwater runoff pollution and mitigation strategies*. *Science of the Total Environment*, 922, 171598. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171598>
- Zhang, Y. (2024). SUDS: *New solution for urban flooding*. *Applied and Computational Engineering*, 58, 283-288.

ANEXOS

Anexo 1: Diseño del sistema sostenible



	PROYECTO: Evaluación del proceso de infiltración mediante un sistema urbano de drenaje sostenible para el manejo de agua de lluvia	TESISTAS: Bach. Noé Castro Marina	F01 Date: 02/04/25 Scale: Indicated
	PLANO: FILTRO, PLANTA Y DETALLES.	ASESOR: Ing. M.Sc. Alfonso Rojas Bardales	

Anexo 2: Panel fotográfico

Fotografía 1 y 2. Elaboración de los sistemas de drenaje.



Fotografía 3. Simulación de luvias.



Fotografía 4. Control de la cantidad de agua filtrada.



Fotografía 5. Registro del tiempo de infiltración.

Noe Castro Marina

Evaluación del proceso de infiltración mediante un sistema urbano de drenaje sostenible para el manejo de aguas de lluvia

 Revisión Repositorio Institucional

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:570811904

Fecha de entrega

24 mar 2026, 12:34 GMT-5

Fecha de descarga

24 mar 2026, 12:38 GMT-5

Nombre del archivo

4. Ing._Sanitario._Noé Castro Marina (1) 03-03-26.pdf

Tamaño del archivo

1.8 MB

67 páginas

15.618 palabras

91.499 caracteres




9% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 8%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 7%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.