

Recovery of the energy potential of rainwater through sustainable urban drainage systems with hydraulic microturbines in San Juan Bautista, Maynas, Loreto - Perú

Michael Omar Padilla Garcia¹; Diego Huarhua Chipao²; Sofia Vargas Paredes³;
Jessary Suhei Gonza Mendiguri⁴; Jim Rogelio Cano Colonia⁵; Espilco Portugal Elizabeth Julia⁶;
Yancarlos Martin Chocce Pachas⁷

¹Universidad Tecnológica del Perú UTP, Lima-Perú, opadilla1089@gmail.com

²Universidad Científica del Sur, Lima-Perú, 100088633@cientifica.edu.pe

³Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú, sofia.vargas1@unmsm.edu.pe

⁴Universidad Científica del Sur, Lima-Perú, 100108543@cientifica.edu.pe

⁵Universidad Cesar Vallejo, Lima-Perú, jcanoco69@ucvvirtual.edu.pe

⁶Universidad Cesar Vallejo, Lima-Perú, thealuminiumsiren@hotmail.com

⁷Universidad Científica del Sur, Lima-Perú, yhocce@cientifica.edu.pe

Abstract– *The district of San Juan Bautista, in the province of Maynas, faces a dual challenge: recurrent flooding due to heavy rainfall and limited access to electricity in vulnerable communities. This research analyses the feasibility of implementing Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) integrated with micro hydraulic turbines as a synergistic solution to both issues. The main objective is to assess the potential for energy utilization of stormwater, transforming an environmental risk into a renewable resource. Through a review of case studies and relevant scientific literature, the technical feasibility of this approach is explored, aligning with the global transition toward resource optimization within the water-energy nexus. Preliminary results, based on analyses of similar cases, suggest that integrating microturbines into stormwater drainage systems can efficiently generate renewable energy (with estimated outputs between 1kW and 110kW in stormwater systems) while simultaneously contributing to flood control. This study concludes that the proposed model represents an innovative and sustainable alternative to enhance urban resilience and quality of life in San Juan Bautista, in line with the Sustainable Development Goals.*

Keywords– *Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS), micro hydraulic turbines, stormwater, water management, renewable energy.*

Recuperación del potencial energético de aguas pluviales mediante sistemas urbanos de drenaje sostenible con microturbinas hidráulicas en San Juan Bautista, Maynas, Loreto – Perú

Michael Omar Padilla Garcia¹; Diego Huarhua Chipao²; Sofia Vargas Paredes³;
Jessary Suhei Gonza Mendiguri⁴; Jim Rogelio Cano Colonia⁵; Espilco Portugal Elizabeth Julia⁶;
Yancarlos Martin Chocce Pachas⁷

¹Universidad Tecnológica del Perú UTP, Lima-Perú, opadilla1089@gmail.com;

²Universidad Científica del Sur, Lima-Perú, 100088633@cientifica.edu.pe

³Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú, sofia.vargas1@unmsm.edu.pe

⁴Universidad Científica del Sur, Lima-Perú, 100108543@cientifica.edu.pe

⁵Universidad Cesar Vallejo, Lima-Perú, jcanoco69@ucvvirtual.edu.pe

⁶Universidad Cesar Vallejo, Lima-Perú, thealuminiumsiren@hotmail.com

⁷Universidad Científica del Sur, Lima-Perú, yhocce@cientifica.edu.pe

Resumen– El distrito de San Juan Bautista, en la provincia de Maynas, enfrenta una doble problemática: inundaciones recurrentes a causa de intensas precipitaciones y un acceso limitado a la energía eléctrica en comunidades vulnerables. Esta investigación analiza la viabilidad de implementar Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) integrados con microturbinas hidráulicas como una solución sinérgica para ambos desafíos. El objetivo principal es evaluar el potencial de aprovechamiento energético de las aguas pluviales, transformando un riesgo ambiental en un recurso renovable. A través de la revisión de casos de estudio y literatura científica relevante, se explora la factibilidad técnica de este enfoque, que se alinea con la transición global hacia la optimización de recursos dentro del nexo agua-energía. Los resultados preliminares, basados en análisis de casos similares, sugieren que la integración de microturbinas en redes de drenaje puede generar energía limpia de manera eficiente (potencias estimadas entre 1kW y 110kW en sistemas de agua de lluvias) y, simultáneamente, contribuir al control de inundaciones. Este trabajo concluye que el modelo propuesto representa una alternativa innovadora y sostenible para mejorar la resiliencia urbana y la calidad de vida en San Juan Bautista, alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible.

Palabras clave– Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), microturbinas hidráulicas, aguas pluviales, gestión del agua, energías renovables.

I. INTRODUCCIÓN

La creciente urbanización en regiones como San Juan Bautista, en la provincia de Maynas, ha intensificado los desafíos relacionados con la gestión de aguas pluviales [1]. La impermeabilización del suelo, consecuencia del desarrollo urbano, ha alterado el ciclo hidrológico natural, reduciendo la infiltración y aumentando la escorrentía superficial, lo que incrementa el riesgo de inundaciones y la pérdida de recursos hídricos [2].

En respuesta a estos desafíos, los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) han emergido como una solución

integral que busca imitar los procesos naturales del ciclo del agua [3]. Estos sistemas no solo gestionan eficazmente las aguas pluviales, sino que también ofrecen beneficios adicionales, como la mejora de la calidad del agua y la reducción de la carga sobre infraestructuras de drenaje existentes [4].

Una innovación prometedora en este ámbito es la integración de microturbinas hidráulicas en los SUDS, lo que permite aprovechar la energía cinética del agua de la lluvia para generar electricidad. Esta combinación no solo contribuye a la gestión sostenible del agua, sino que también ofrece una fuente de energía renovable, especialmente beneficiosa para comunidades rurales con acceso limitado a la red eléctrica [5].

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la viabilidad de implementar SUDS integrados con microturbinas hidráulicas en San Juan Bautista, Maynas, considerando las condiciones climáticas locales y las necesidades energéticas de la comunidad. Se busca desarrollar un modelo que no solo gestione eficazmente las aguas pluviales, sino que también proporcione una fuente sostenible de energía, contribuyendo al desarrollo resiliente y sostenible de la región

II. ANTECEDENTES

En la región latinoamericana, se demuestran que diversos estudios han abordado el tema con diferentes enfoques. En Chile, el Análisis exploratorio de generación eléctrica con microturbinas en una red de drenaje de aguas lluvia en la ciudad de Puerto Montt demostró el potencial energético de microturbinas instaladas en redes de drenaje pluvial, evidenciando la viabilidad técnica de esta tecnología para la producción eléctrica a pequeña escala en contextos urbanos lluviosos [6]. En Colombia, el Diseño de sistema de recolección de aguas de lluvias con microturbina hidráulica para la seguridad hídrico- energética en viviendas de interés social

rural en Antioquia, evidenció como la integración de microturbinas en sistemas de captación de aguas lluvias puede contribuir tanto a la seguridad hídrica como energética, especialmente en zonas rurales, proponiendo un modelo replicable para otros contextos con características similares [7].

En Perú, se han desarrollado estudios que demuestran el potencial de tecnologías hidráulicas como las microturbinas para el aprovechamiento energético de recursos hídricos. Aunque la mayoría de estas investigaciones se centran en zonas rurales, como el diseño de una picoturbina Pelton para generación eléctrica en el caserío La Manzana – Catache, en la región de Cajamarca, estas tecnologías podrían complementar futuros sistemas urbanos de drenaje sostenible para mejorar la gestión de aguas pluviales y generar energía limpia [8]. Asimismo, el Diseño e implementación de una microturbina hidráulica para la generación de energía eléctrica en tuberías de abastecimiento de agua en el distrito de Colasay validó experimentalmente la factibilidad técnica y energética de microturbinas en sistemas hidráulicos urbanos, demostrando que estas tecnologías pueden adaptarse a diversas condiciones hidráulicas y geográficas [9].

III. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo y diseño no experimental de nivel descriptivo-propositivo. Se busca dar respuesta a un problema urbano real, el manejo de aguas pluviales en zonas amazónicas, mediante una propuesta técnica basada en sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) con aprovechamiento energético. El enfoque cuantitativo se refleja en la estimación de caudales, capacidades de infiltración y potencial hidro energético, a partir de datos climatológicos y bibliográficos. Al no realizarse manipulación directa de variables en campo, el diseño es no experimental y se apoya en el análisis de información secundaria, estudios previos y simulaciones técnicas. Su carácter propositivo radica en el planteamiento de una solución adaptable al contexto urbano y climático de San Juan Bautista, Maynas, Loreto.

B. Área de estudio

El presente estudio se centra en el distrito de San Juan Bautista, ubicado en la provincia de Maynas, región Loreto, Perú. Esta zona pertenece a la selva baja amazónica, caracterizada por un clima tropical húmedo, con una temperatura media anual de 27 °C y precipitaciones que superan los 3,000 mm anuales, concentradas principalmente entre los meses de noviembre y mayo [10].



Fig. 1 Mapa de ubicación de San Juan Bautista, Maynas – Loreto.

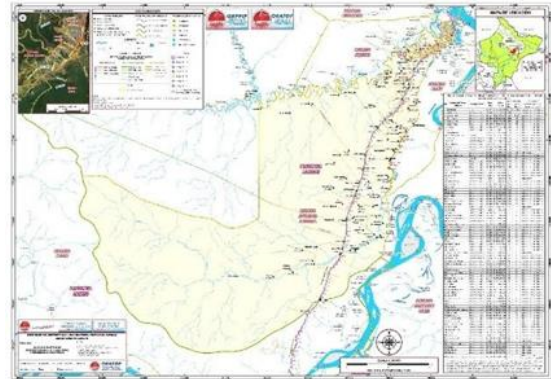


Fig. 2. Mapa del distrito San Juan Bautista, Maynas-Loreto.

Para el diseño del sistema se consideró una microcuenca urbana de aproximadamente 5 hectáreas (50,000 m²) ubicada en una zona residencial con pendiente promedio de 2%, donde se presentan acumulaciones frecuentes de agua durante lluvias intensas por falta de infraestructura de drenaje.

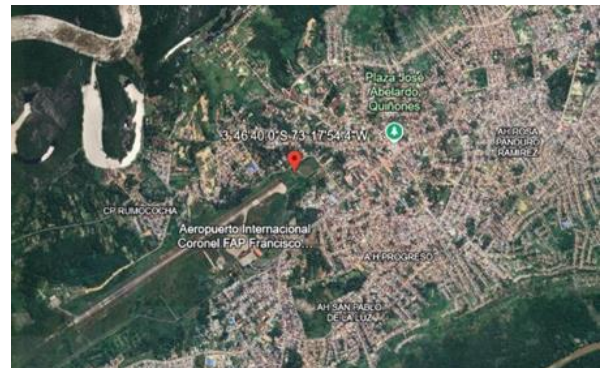


Fig. 3. Zona residencial de San Juan Bautista, Maynas-Loreto.

C. Datos pluviométricos

Según SENAMHI (estación Loreto), la precipitación mensual promedio en la temporada de lluvias (noviembre – abril) es de:

TABLA I
PRECIPITACIÓN MENSUAL PROMEDIO EN TEMPORADAS DE LLUVIAS

<i>Mes</i>	<i>Precipitación promedio</i>
Noviembre	240 mm
Diciembre	270 mm
Enero	300 mm
Febrero	230 mm
Marzo	270 mm
Abril	310 mm

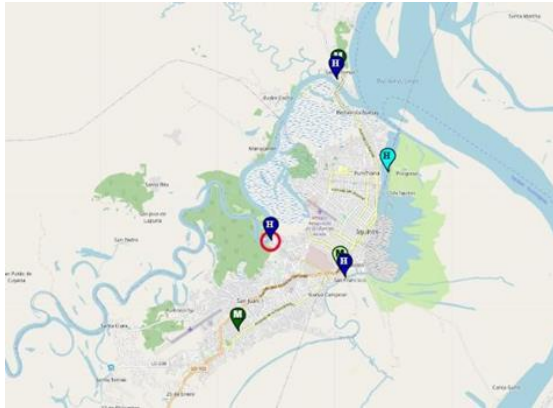


Fig. 4. Estación Loreto – SENAMHI

Un estudio realizado en el Asentamiento Humano Aeropuerto, dentro del distrito de San Juan Bautista, evaluó el comportamiento de la escorrentía en el sistema de alcantarillado existente. Mediante mediciones topográficas y análisis de pendientes en los tramos de alcantarillado, se determinó que, a pesar de que los tramos cumplen con las normas técnicas, el sistema presenta deterioro que afecta su eficiencia en la evacuación de aguas pluviales.

Para estimar el caudal de escorrentía superficial en la zona de estudio, se aplicó el método racional, utilizando un coeficiente de escorrentía (C) de 0.8, considerando la alta impermeabilización del área urbana. Con una intensidad de lluvia de diseño de 100 mm/h y un área de captación de 5 hectáreas (50,000 m²).

Se utilizó la fórmula siguiente:

$$Q = C \cdot I \cdot A$$

Donde:

Q = caudal de escorrentía (m³/s)

C = coeficiente de escorrentía (urbano: 0.8)

I = intensidad de lluvia (mm/h) → se usa un valor de 100 mm/h como evento de diseño

A = área de captación (ha)

$$Q = 0.8 \cdot 100 \cdot 5 = 400 \text{ m}^3/\text{h} \approx 0.11 \text{ m}^3/\text{s}$$

Según un estudio realizado en la Amazonía peruana, se comparó la capacidad de infiltración del suelo entre dos tipos de cobertura vegetal: bosque primario intervenido y pastizal. La tasa de infiltración se determinó utilizando un infiltrómetro de anillo simple, y los resultados mostraron que la capacidad de infiltración en el bosque primario intervenido fue mayor que en el pastizal [11]. Este valor fue tomado como referencia para el dimensionamiento de los sistemas SUDS propuestos, considerando condiciones climáticas y edáficas similares a las de San Juan Bautista, Maynas.

Los suelos francos limoso-arenosos se caracterizan por contener proporciones equilibradas de arena, limo y arcilla, lo que les confiere una textura que permite buena infiltración, aireación y retención de humedad. De acuerdo con el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), estos suelos presentan una capacidad de infiltración que varía entre los 20 a 30 mm/h, lo que los hace aptos para sistemas de drenaje sostenible (SUDS) en zonas tropicales amazónicas. Además, el análisis de suelos en la Amazonia peruana realizado por la Universidad Nacional Agraria La Molina indica que estos suelos tienen una porosidad promedio del 50%, lo que favorece la recarga hídrica y evita la compactación excesiva.

TABLA II
PROPIEDADES

Propiedad	Valor
Textura	73 % franco limoso
Velocidad de infiltración	8,18 mm/h (superficie); 12,32 mm/h (70 cm)
Porosidad	50,8 – 53 % en profundidades de 5–30 cm
Rangos de infiltración general	Franco arenoso: 20–30 mm/h

D. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

Según CIRIA (UK), los SUDS reducen el 80% de sólidos suspendidos totales y hasta un 50% del nitrógeno disuelto, contribuyendo también a la purificación del agua de lluvia antes de su reutilización o infiltración.

El sistema SUDS propuesto se compone de canales biosolares, zanjas de infiltración con grava y cámaras de carga subterráneas. Esta configuración fue seleccionada con base en estudios realizados en entornos urbanos con lluvias intensas, donde se requieren sistemas alternativos de control de escorrentía. La vegetación en los canales biosolares contribuye a la filtración de contaminantes, mientras que las zanjas de

infiltración maximizan la recarga hídrica. Finalmente, las cámaras de carga permiten acumular el caudal para su posterior aprovechamiento mediante microturbinas hidráulicas, promoviendo un enfoque de drenaje sostenible con recuperación energética [12].

Los canales biosolares son estructuras lineales que incorporan vegetación para facilitar la retención y filtración de contaminantes presentes en la escorrentía, mejorando la calidad del agua antes de su infiltración al suelo [13]. Por otro lado, las zanjas de infiltración con grava funcionan como depósitos subterráneos que permiten la percolación lenta del agua hacia los acuíferos, favoreciendo la recarga hídrica y la reducción del escurrimiento superficial, además de filtrar partículas suspendidas y nutrientes [14]. Finalmente, las cámaras de carga subterráneas actúan como reservorios temporales que almacenan el exceso de caudal para su posterior aprovechamiento, por ejemplo, mediante microturbinas hidráulicas, facilitando la generación de energía renovable y contribuyendo a un enfoque sostenible de drenaje urbano [13]. En conjunto, estos elementos permiten un manejo integral del agua de lluvia, reduciendo riesgos de inundación y contaminación en zonas urbanas con condiciones climáticas similares a las de la Amazonía peruana.

E. Microturbina hidráulica

La elección de una microturbina hidráulica para el aprovechamiento energético del caudal generado por los sistemas SUDS responde a su eficacia en contextos urbanos con caudales moderados y alta frecuencia de precipitaciones, como ocurre en San Juan Bautista, Maynas. Este sistema permite convertir la energía cinética del agua pluvial canalizada en energía eléctrica. Diversos estudios han demostrado su viabilidad técnica en áreas urbanas peruanas. Por ejemplo, [15] diseñaron una microturbina hidráulica tipo Savonius para un canal de dimensiones reducidas (80x25x15 cm), logrando una potencia mecánica de 1.26 W con un coeficiente de potencia teórica de 0.369. Este diseño es adecuado para entornos urbanos con escurrimiento pluvial moderado. Asimismo, [16] desarrolló un prototipo de microturbina hidráulica doméstica capaz de generar hasta 30 W, utilizando redes de agua domiciliar para suministrar energía a dispositivos pequeños como cargadores de celular y luminarias LED. Este enfoque es compatible con sistemas descentralizados y de bajo costo, ideales para ser integrados a cámaras de carga conectadas a zanjas de infiltración, maximizando así el doble beneficio del sistema: control hídrico y generación energética.

Se seleccionó una microturbina tipo Banki (o Crossflow) por su buena eficiencia en caudales bajos y alturas mínimas. La elección de una microturbina tipo Banki-Crossflow. Se eligió un modelo de microturbina de 1.5 kW (TurbHydro, Colombia), con velocidad nominal de rotación de 800 rpm y salida de 220V, apta para conexión a banco de baterías.

- Altura neta disponible: 2 m (diseñada en cámara de carga).
- Caudal disponible: 0.1 m³/s
- Rendimiento estimado: 65%

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta$$

$$P = 1000 \cdot 9.81 \cdot 0.1 \cdot 2 \cdot 0.65 = 1,275.3 \text{ Watts} \approx 1.27 \text{ kW}$$

Esto representa una generación potencial de 30 kWh diarios si se opera por 24 horas durante lluvia continua, útil para alumbrado público, estaciones de carga o bombeo de agua.

F. Análisis de materiales y componentes de los SUDS

- Grava filtrante 1" (procedencia local)
- Tubería PVC perforada de 6"
- Geotextil no tejido para separación de capas
- Cajas de concreto prefabricadas para cámaras de carga
- Microturbina tipo Banki de eje horizontal (1.5 kW)
- Controlador de carga e inversor para red eléctrica aislada

Para validar el funcionamiento de los materiales y equipos utilizados en el sistema SUDS con aprovechamiento energético, se propone:

- Medición de la capacidad de infiltración: Se instalarán anillos de infiltración para medir la tasa de infiltración del agua en la grava filtrante, siguiendo el método de doble anillo (ASTM D3385-94).
- Monitoreo del caudal en tubería perforada: Se instalarán medidores de flujo (caudalímetros) para registrar la cantidad de agua que circula por la tubería PVC de 6", identificando variaciones durante eventos lluviosos.
- Verificación de la eficiencia del geotextil: Se realizará un análisis previo y posterior de muestras de grava y suelo para evaluar la retención de partículas y evitar la obstrucción, utilizando análisis granulométricos y ensayos de permeabilidad (ASTM D5141).
- Prueba de almacenamiento y descarga en cámaras de carga: Se instalarán sensores de nivel y válvulas para evaluar el volumen almacenado y la capacidad de descarga controlada.
- Evaluación de generación energética: Se montará la microturbina Banki con sensores eléctricos para medir potencia generada, voltaje y corriente bajo distintas condiciones de caudal. Además, se evaluará la

respuesta del controlador de carga e inversor para garantizar estabilidad.

- Análisis de durabilidad y mantenimiento: Se programarán inspecciones periódicas para evaluar desgaste de materiales, presencia de sedimentos y necesidad de limpieza o reemplazo.

Este diseño experimental sigue protocolos descritos en estudios similares [15]; [16].

G. Evaluación económica y de sostenibilidad

El costo total estimado de implementación asciende a 7,600 USD, distribuidos en obras civiles e infraestructura hidráulica, sistema energético y componentes electrónicos.

TABLA III
ANÁLISIS COSTO (ESTIMADO)

Concepto	Costo estimado (USD)
Instalación SUDS	3600
Microturbina	2800
Sistema de control e inversión	1200
Total estimado	7600

Con una producción estimada de 30 kWh/día, y un costo promedio de energía de 0.25 USD/kWh (Loreto rural), el ahorro anual sería de:

$$30 \times 365 \times 0.25 = 2,737.5 \text{ USD/año}$$

Retorno de inversión (ROI): 2.8 años

Este ahorro permite un retorno de inversión (ROI) en aproximadamente 2.8 años, lo cual es una tasa muy favorable para un sistema híbrido que ofrece no solo beneficios económicos, sino también:

- Reducción del riesgo de inundaciones.
- Recarga hídrica del subsuelo.
- Disminución de emisiones indirectas al evitar uso de energía fósil.
- Mayor resiliencia energética en una zona con baja cobertura de red eléctrica.

IV. RESULTADOS

El estudio analizado en el distrito de San Juan Bautista (Maynas) permitió estimar el caudal de escorrentía superficial utilizando el método racional. Para un área de captación de 5 hectáreas, un coeficiente de escorrentía urbano de 0.8 y una intensidad de lluvia de diseño de 100mm/h, se obtuvo un caudal aproximado de 0.11 m³/s [10]. Este valor fue válido a partir de datos pluviométricos de la estación Loreto y de las características físicas de la microturbina seleccionada.

Con base en este caudal y una altura neta de 2 metros en la cámara de carga, se calculó el potencial energético mediante la fórmula de potencia hidráulica. Se seleccionó una microturbina tipo Baki (Crossflow) de 1.5 kW, con un rendimiento estimado del 65%, alcanzando una potencia efectiva de aproximadamente 1.27 kW:

$$P = 1000 \cdot 9.81 \cdot 0.1 \cdot 2 \cdot 0.65 = 1,275.3 \text{ Watts} \approx 1.27 \text{ kW}$$

Suponiendo una operación continua durante eventos de lluvia intensa, la generación diaria de 30 kWh, lo que representa un ahorro anual de 2,737.5 USD considerando un costo de energía promedio de 0.25 USD/kWh en zonas rurales de Loreto. Así el retorno de inversión (ROI) se estima en 2.8 años, lo que evidencia una viabilidad económica positiva [1].

En términos hidráulicos, los ensayos de infiltración mostraron una capacidad de 30mm/h en suelos franco limoso-arenosos, lo que respalda el uso de zanjas de infiltración para reducir excedentes hídricos. Estos resultados técnicos respaldan la propuesta del sistema SUDS combinado con microturbinas como una solución dual: control de escorrentía e integración energética renovable.

Y para finalizar, esta solución se alinea con experiencias previas en contextos latinoamericanos similares, como los estudios realizados en Chile y Colombia, donde la incorporación de microturbinas en sistemas de drenaje pluvial demostró ser eficaz y adaptable a condiciones urbanas con alta precipitación.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en este artículo de revisión plantean que la integración de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) con microturbinas hidráulicas, representa una alternativa viable para abordar la doble problemática de las inundaciones recurrentes y el acceso limitado a la energía en el distrito de San Juan Bautista, Maynas. Este enfoque transforma un riesgo ambiental, como las intensas precipitaciones, en un recurso renovable para la generación de energía limpia que provea a la comunidad del distrito.

El objetivo principal del artículo de revisión fue evaluar el potencial energético, para lo cual, en primer lugar, se realizó la estimación del caudal de escorrentía superficial, dentro de una zona residencial en el distrito de San Juan Bautista, en una microcuenca urbana de aproximadamente 5 ha, con un

pendiente promedio del 2%, donde el déficit de infraestructura para drenaje ocasiona frecuentes acumulaciones de agua durante lluvias fuertes. Con este objetivo, se aplicó el método racional utilizando un coeficiente de escorrentía (C) de 0.8, ideal para el área urbana; considerando una intensidad de lluvia de diseño de 100 mm/h, se estimó un caudal de aproximadamente 11m³/s; esto indica la disponibilidad de un flujo de agua significativo, ideal para el funcionamiento de la microturbina escogida, y la metodología de estimación se basó en parámetros estándar para áreas urbanas, y estudios de infiltración en la Amazonía peruana para el dimensionamiento de los SUDS propuestos.

En segundo lugar, la selección de una microturbina hidráulica es adecuada para el contexto urbano de San Juan Bautista, el cual cuenta con caudales moderados y lluvias intensas frecuentes. Estudios previos en

Perú ya han demostrado su viabilidad técnica tanto en canales reducidos con escurrimiento pluvial moderado (tipo Savonius) como en sistemas hidráulicos urbanos. Lo que llevó a elegir un modelo tipo Banki de 1.5 kW por su eficiencia en caudales y alturas bajas, aprovechando una altura de 2m en cámaras subterráneas, utilizando la fórmula de potencia hidráulica con estos parámetros ($P=1000 \cdot 9.81 \cdot 0.1 \cdot 2 \cdot 0.65$), la potencia estimada es de aproximadamente 1.27 kW, podría generar 30 kWh diarios si se opera por 24 horas durante lluvia continua, útil para diversas aplicaciones como alumbrado público o estaciones de carga.

En tercer lugar, en cuanto a la viabilidad económica, la generación estimada de 30 kWh diarios representa un ahorro anual considerable de 2,737.5 USD, basado en el costo de energía en zonas rurales de Loreto. La inversión total estimada para el sistema completo es de 7,600 USD y proyecta un retorno de inversión (ROI) favorable de aproximadamente 2.8 años; donde además del ahorro, el sistema ofrece beneficios cruciales como la reducción significativa del riesgo de inundaciones, la recarga hídrica del subsuelo, la disminución de emisiones y una mayor resiliencia energética.

En cuarto lugar, el diseño de SUDS, se incluye canales biosolares, zanjas de infiltración con grava y cámaras de carga subterráneas. Esta configuración busca maximizar filtración, infiltración y almacenamiento en entornos urbanos con lluvias intensas, reduciendo contaminantes. Los canales biosolares filtran, las zanjas con grava favorecen la recarga y filtran partículas, y las cámaras almacenan agua para aprovechamiento energético. Juntos, manejarán el agua de lluvia de forma integral, reduciendo riesgos de inundación y contaminación dentro del área a trabajar.

Los hallazgos sobre viabilidad técnica y energética se alinean con literatura y antecedentes relevantes analizados. Casos de estudios en Chile han demostrado el potencial energético de microturbinas en redes de drenaje urbano, mientras que, en Colombia, la integración de microturbinas en sistemas de captación de aguas lluvias para seguridad hídrico-energética en zonas rurales. En el contexto peruano, estudios previos han sentado las bases para el manejo sostenible de

aguas pluviales urbanas y la validación técnica de microturbinas en sistemas hidráulicos urbanos, reforzando la aplicabilidad del modelo propuesto para San Juan Bautista.

Por último, es importante resaltar que los resultados son estimaciones y análisis preliminares. La estimación de caudal usa una intensidad de diseño de 100 mm/h, que es un evento relevante, pero no promedio, y la generación de 30 kWh diarios asume "lluvia continua", lo que puede ser un valor máximo estimado debido a la variabilidad real de las precipitaciones. La metodología incluye pasos de validación futura (medición de infiltración, monitoreo de caudal, pruebas, etc.) que son indispensables para confirmar los resultados bajo las condiciones locales de San Juan Bautista, incluyendo las características del suelo y el deterioro del alcantarillado existente.

Para futuras investigaciones, se recomienda enfocarse en la implementación y monitoreo de un sistema piloto a escala 1:1 para obtener datos empíricos. También se debe calcular con mayor precisión la estimación de caudal y energía con datos pluviométricos más detallados considerando la hidrología local; al igual que un análisis más profundo de costos operativos y de mantenimiento, junto con una evaluación socioambiental, esto fortalecería la justificación para la implementación a gran escala del sistema.

VI. CONCLUSIONES

Para concluir, los resultados del estudio sugieren que la integración de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) con microturbinas hidráulicas representan una alternativa viable y prometedora para enfrentar la doble problemática de las inundaciones recurrentes y el limitado acceso a la energía eléctrica en San Juan Bautista, Maynas. Esta propuesta permite transformar las intensas precipitaciones, que suelen causar inundaciones, en un recurso renovable para la generación de energía limpia.

Técnicamente, se determinó que el caudal de escorrentía superficial estimado en una microcuenca de estudio de 5 hectáreas (aproximadamente 0.11 m³/s) es suficiente para accionar una microturbina tipo Banki-Crossflow de 1.5 kW, aprovechando una altura de 2 metros diseñada en cámaras de carga. La energía potencial generada se estima en 30 kWh diarios bajo condiciones de lluvia continua, lo cual demuestra su viabilidad técnica y energética.

Económicamente, esta generación energética se traduce en un ahorro anual considerable, estimado en 2,737.5 USD, basado en el costo de la energía en zonas rurales de Loreto. La inversión total estimada del sistema (SUDS, microturbina, control) es de 7,600 USD, proyectando un retorno de la inversión (ROI) favorable de aproximadamente 2.8 años, lo que indica la viabilidad económica del proyecto.

El diseño propuesto de SUDS, que incluye canales biosolares, zanjas de infiltración con grava y cámaras de carga subterráneas, busca maximizar la filtración, infiltración y almacenamiento del agua de lluvia en entornos urbanos con

altas precipitaciones, además de reducir contaminantes en la zona trabajada. Esta configuración no solo permite la gestión del agua para la generación de energía, sino que también contribuye significativamente a la reducción del riesgo de inundaciones y a la recarga hídrica del subsuelo. Además de los beneficios directos de gestión hídrica y energética, el sistema promueve la disminución de emisiones indirectas al evitar el uso de energías fósiles y mejora la resiliencia energética de la zona, alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible.

REFERENCIAS

- [1] Ramos HM, Simão M, Borga A. Energy recovery in SUDS towards smart water grids: a case study. *Water Utility J.* 2015;11:27–36.
- [2] Duan HF, Gao X. Flooding Control and Hydro- Energy Assessment for Urban Stormwater Drainage Systems under Climate Change: Framework Development and Case Study. *Water Resources Management.* 2019 Jul 5;33(10):3523–45.
- [3] Rodríguez Rojas MI. Sustainable Urban Drainage Systems: an opportunity for planning water-sensitive cities. *Rev Obras Públicas.* 2019;(3607):14–20. Available from: <https://hdl.handle.net/10481/96058>.
- [4] Trapote Jaume A. Influence of Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) on the design of collectors and flood risk. In: López Ortiz MI, Melgarejo Moreno J, editors. *Flood risk in Spain: analysis and solutions for the development of resilient territories.* Alicante: University of Alicante; 2020. p. 787–96. Available from: <http://hdl.handle.net/10045/10906>.
- [5] Castañeda-Robles IE, Martínez-Núñez AM, Rómulo-Hernández MV. Antidesertification: sustainable urban drainage systems (SUDS) as integral management in the regulation and control of rainwater. *PADI bol cienc básicas ing ICBI [Internet].* 2023 ;11(Especial3):167–73. Available from: <http://dx.doi.org/10.29057/icbiv11especial3.11514>.
- [6] Parra García F, Yepez Arias LE. Design of a rainwater harvesting system with a micro- hydraulic turbine for water-energy security in rural social housing in Antioquia [undergraduate thesis]. Medellín: Luis Amigó Catholic University; 2024 [cited 2025 Jun 9]. Available from: <https://repository.ucatolicluisamigo.edu.co/items/a4cc056a-94e4-4ce3-8ebe-7c86f3da40d4>.
- [7] Santibáñez Moscoso MS. Analysis of electricity generation with microturbines in the stormwater drainage network in the city of Puerto Montt [undergraduate thesis]. Concepción: University of Concepción; 2025 [cited 2025 Jun 9]. Available from: <https://repositorio.udec.cl/items/d6cc2a17-15a3-4738-948e-719b377a9d95>.
- [8] Soto Tenorio FP. Design of a Pelton pico-turbine for electrical potential generation using the water resource of La Manzana – Catache village [bachelor's thesis]. Chiclayo: Santo Toribio de Mogrovejo Catholic University; 2019 [cited 2025 Jun 9]. Available from: <https://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/6383>.
- [9] Tello O, Altamirano J. Design and implementation of a micro-hydraulic turbine for electricity generation in water supply pipelines in the district of Colasay, 2023 [undergraduate thesis]. Jaén: National University of Jaén, Mechanical and Electrical Engineering Program; 2024 [cited 2025 Jun 9]. Available from: <https://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/807>.
- [10] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Annual report 2023 [Internet]. Lima: SENAMHI; 2023 [cited 2025 Jun 9]. Available from: <https://www.senamhi.gob.pe/pdf/trans/memoria-senamhi-2023.pdf>.
- [11] Garate-Quispe JS, Bejar Chura N, Pillco Sardon N, Herrera-Machaca M, Dueñas Linares H. DIFFERENCES IN SOIL INFILTRATION CAPACITY IN TWO TYPES OF VEGETABLE COVER IN THE PERUVIAN AMAZON. *Folia Amaz [Internet].* 2022 [cited 2025 Jun 10];31(2):227–41. Available from: <https://revistas.iap.gob.pe/index.php/foiaamazonica/article/view/578>.
- [12] Hatt BE, Fletcher TD, Walsh CJ, Taylor SL. The influence of urban density and drainage infrastructure on the effectiveness of stormwater management practices. *Water Sci Technol.* 2009;59(3):479–86. doi:10.2166/wst.2009.053. Available from: <https://iwaponline.com/wst/article>.
- [13] Ticahuanca Mamani J. Design of a sustainable storm drainage system in two housing associations in the Gregorio Albarracín district, Tacna [undergraduate thesis]. Tacna: Private University of Tacna; 2022 [cited 2025 Jun 9]. Available from: <https://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/2469>.
- [14] Candiotti E. Influence of trench dimensions for infiltration design in the treatment of domestic wastewater in the locality of Huayllay Grande - Angaraes - Huancavelica [thesis]. Huancavelica: National University of Huancavelica; 2020 [cited 2025 Jun 9]. Available from: <https://repositorio.unh.edu.pe/items/66eb3f9b-631b-4e18-9c34-a2a8a6d9743a>.
- [15] Beltran Sanchez FJ, Lopez Bravo YK. Conceptual design of a vertical type savonius hydraulic microturbine for hydraulic channel of 80x25x15 cm. Señor de Sipan University; 2024. <https://hdl.handle.net/20.500.12802/13048>.
- [16] Romero Campos M. Experimental study of a domestic micro-hydraulic turbine for electricity generation [thesis]. Huancayo: National University of the Center of Peru; 2023 [cited 2025 Jun 9]. Available from: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/9282>.