

ARTICULO DE INVESTIGACIÓN CIEN sin referencias

Tesis Informe Antiplagio.docx

 Universidad Peruana Union

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::29566:488607222

Fecha de entrega

29 ago 2025, 2:43 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

29 ago 2025, 2:45 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

Tesis Informe Antiplagio.docx

Tamaño del archivo

8.4 MB

27 páginas

6544 palabras

37.513 caracteres

7% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado

Fuentes principales

- 6%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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.

Fuentes principales

- 6% Fuentes de Internet
- 1% Publicaciones
- 3% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	repositorio.upla.edu.pe	<1%
2	Trabajos entregados	Universidad Católica de Santa María on 2023-11-15	<1%
3	Trabajos entregados	Universidad Anahuac México Sur on 2021-12-13	<1%
4	Internet	www.grafiati.com	<1%
5	Internet	per.sika.com	<1%
6	Trabajos entregados	Pontificia Universidad Catolica del Ecuador - PUCE on 2022-10-24	<1%
7	Internet	ehu.eus	<1%
8	Internet	repositorio.unsm.edu.pe	<1%
9	Trabajos entregados	Universidad San Ignacio de Loyola on 2022-12-14	<1%
10	Internet	casap.com.co	<1%
11	Internet	www.environment.vic.gov.au	<1%

12	Internet	www.coursehero.com	<1%
13	Internet	www.seeci.net	<1%
14	Internet	accedacris.ulpgc.es	<1%
15	Internet	bdigital.unal.edu.co	<1%
16	Internet	repository.uamerica.edu.co	<1%
17	Internet	www.ociocritico.com	<1%
18	Internet	ra.org	<1%
19	Internet	repository.globethics.net	<1%
20	Trabajos entregados	unapiquitos on 2025-03-13	<1%
21	Internet	uvadoc.uva.es	<1%
22	Internet	www.eea.europa.eu	<1%
23	Internet	www.imepe-alcorcon.com	<1%
24	Internet	www.unep.org	<1%
25	Publicación	Artaza, Nicolás Santelices. "Coastal Planning Comparative Analysis and Recomme...	<1%

26	Internet	at3w.com	<1%
27	Internet	catalog-test.lib.uchicago.edu	<1%
28	Internet	cdn.www.gob.pe	<1%
29	Internet	cisternasrendon.com	<1%
30	Internet	es.slideshare.net	<1%
31	Internet	pt.slideshare.net	<1%
32	Internet	recit.uabc.mx	<1%
33	Internet	tesf.org	<1%
34	Internet	www.cakex.org	<1%
35	Internet	www.envi-met.com	<1%
36	Internet	www.esan.edu.pe	<1%
37	Internet	www.portaldelaguapwp.com.pe	<1%
38	Internet	www.slideshare.net	<1%
39	Internet	www.theibfr.com	<1%

40	Trabajos entregados	Universidad del Norte, Colombia on 2025-05-06	<1%
41	Trabajos entregados	Erasmus University of Rotterdam on 2024-01-22	<1%
42	Internet	es.scribd.com	<1%
43	Internet	aura.abdn.ac.uk	<1%

CIUDAD ESPONJA EN LA AMAZONÍA PERUANA: EVALUACIÓN HIDROTERMICA DE BOSQUES URBANOS Y OJOS DE AGUA

Sponge City in the Peruvian Amazon: Hydrothermal evaluation of urban forest and water springs

RESUMEN

40
24
Esta investigación evaluó los bosques y ojos de agua urbanos presentes en la ciudad de Tarapoto, como infraestructuras de tipo esponja en el contexto amazónico. Mediante un diseño metodológico en cuatro etapas, los resultados evidenciaron que estos sistemas naturales contribuyen a una reducción térmica entre -2°C a 6°C en el entorno urbano inmediato y generan 240 m³ de recarga subterránea de los ojos de agua. Los seis ojos de agua fueron clasificados como infraestructuras verdes y azules de alta capacidad funcional. Este estudio posiciona a los ecosistemas urbanos amazónicos como soluciones basadas en la naturaleza (SbN) con potencial para mitigar los efectos del cambio climático, reducir la isla de calor urbana y mejorar la gestión urbana del agua. A su vez, propone la incorporación estratégica de estas infraestructuras en la planificación territorial amazónica, ofreciendo un modelo replicable de ciudad esponja para contextos tropicales vulnerables.

Palabras clave: Amazonía, bosques urbanos, ciudad esponja, ojos de agua, Tarapoto,

ABSTRACT

41
11
This research evaluated urban forests and springs in the city of Tarapoto as sponge-like infrastructure in the Amazonian context. Using a four-stage methodological design, the results showed that these natural systems contribute to a thermal reduction of up to -2°C to 6°C in the immediate urban environment and generate 240 m³ of groundwater recharge for the springs. The springs were classified as green and blue infrastructure with high functional capacity. This study positions Amazonian urban ecosystems as nature-based solutions (NBS) with the potential to mitigate the effects of climate change, reduce the urban heat island, and improve urban water management. It also proposes the strategic incorporation of these infrastructures into Amazonian territorial planning, offering a replicable sponge city model for vulnerable tropical contexts.

Keywords: Amazon, urban forests, sponge city, water springs, Tarapoto, urban forests

INTRODUCCIÓN

La gestión del agua urbana se enfrenta a desafíos cada vez mayores en todo el mundo degradando los espacios naturales, que son fundamentales para la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas globales (Ngoc et al., 2024). El 85% de la población de América Latina vive en zonas urbanas, lo que representa los niveles más altos de urbanización del mundo (ONU, 2012), esta tendencia, aunque responde a múltiples factores sociales y económicos, ha traído consigo importantes desafíos ambientales. En particular, en la región amazónica el impacto del crecimiento urbano y la inadecuada gestión del agua vienen afectando gravemente los ecosistemas, comprometiendo su función en la regulación del paisaje, la diversidad biológica y el equilibrio climático (Da Silva et al., 2017; Rodríguez & Redondo, 2023), en las última dos décadas, entre 2001 y 2020, la región amazónica ha perdido 54.2 millones de hectáreas de bosques (RAISG, 2023) atravesando cambios significativos debido a la intensificación y expansión de actividades de desarrollo y extracción de recursos.

La región amazónica del Perú ha experimentado una pérdida del 4.08% de su cobertura forestal en comparación con el año 2000 (RAISG, 2023), dentro de este contexto de deforestación y transformación del paisaje, la conurbación conformada por Tarapoto, Morales y La Banda de Shilcayo, en la provincia de San Martín, se ha consolidado como la tercera área más poblada de la Amazonía peruana, reflejando el crecimiento urbano en la región con 144,839 habitantes entre sus distritos conurbados (Zucchetti & Freundt, 2020), sin embargo, este crecimiento ha traído consigo una serie de impactos negativos, lo que ha derivado en una gestión inadecuada de los recursos hídricos, así como en una deforestación indiscriminada de sus ecosistemas boscosos, tal como se evidencia en el Plan de Desarrollo Urbano (PDU) de la ciudad de Tarapoto en 2019 (Municipalidad Provincial De San Martín, 2019) y un estudio desarrollado por el Ministerio del Ambiente indica que la región San Martín desde el 2001 al 2023 se han perdido 515,364 hectáreas de bosque amazónico (Ministerio del Ambiente del Perú, 2013).

Esta conurbación amazónica tropical, ubicada al nororiente del Perú, alberga una importante infraestructura verde y azul, conformada por elementos naturales como los bosques urbanos inundables de palmeras, conocidos como aguajales (Ministerio del Ambiente del Perú, 2013), y los acuíferos subterráneos denominados localmente "ojos de

agua". Estos ojos de agua, situados dentro de los aguajales, cumplen un rol fundamental en la gestión sostenible del territorio, ya que contribuyen a la configuración de la ciudad esponja en el contexto amazónico, su relevancia radica en las características que presentan: un espacio físico natural, vegetación nativa, capacidad de almacenamiento hídrico y superficies altamente permeables.

En contextos amazónicos, los bosques urbanos representan un componente esencial de la infraestructura verde de las ciudades, ya que proporcionan una amplia gama de servicios ecosistémicos que mejoran la calidad del entorno físico, incluyendo la pureza del aire y del agua, en consecuencia, una adecuada gestión de estos espacios y la diversidad de paisajes que ofrecen pueden fomentar la sostenibilidad en las áreas urbanas y convertirse en una estrategia eficaz (Shen, 2023). El principal obstáculo para el uso de acuíferos urbanos como componente de Ciudad Esponja es la caracterización de la hidrogeología urbana (Meng, et al 2022). Tanto los cuerpos de agua y los bosques son elementos que mitigan el efecto de Isla de Calor Urbano (IUH), los ríos dentro de áreas urbanas cumplen una función significativa al reducir las temperaturas en su entorno.

En ciudades amazónicas, existe una tensión evidente entre la adopción de modelos globalizados de estrategias de planificación urbana sostenible para una mejor gestión del agua (pensados para climas templados) y la necesidad de estrategias que valoren la diversidad biocultural. Se menciona sobre la “desigualdad epistemológica” que margina los saberes indígenas en torno al manejo del agua, como los sistemas asociados a humedales o manantiales, cuya eficacia ha sido comprobada (Santos,2016). La aplicación acrítica de enfoques foráneos puede provocar un “epistemicidio” al invisibilizar estos conocimientos locales, como señala el libro de las epistemologías del Sur. Por lo tanto, es imprescindible impulsar un urbanismo tropical situado, sensible a las dinámicas hidrológicas, a la ecología local y a los significados culturales del agua. Desde la ecología política urbana, las infraestructuras hídricas no son neutras: representan disputas de poder en torno al acceso, uso y control del agua (Swyngedouw, 2004). En este marco, los aguajales y ojos de agua amazónicos no deben entenderse solo como recursos ecológicos, sino también como territorios en disputa vinculados a la justicia ambiental, la identidad y los derechos colectivos.

La presente investigación tiene como objetivo evaluar la conurbación de la ciudad de Tarapoto a través de indicadores ambientales, sociales y físico-territoriales, con el fin de mejorar la gestión del agua en un entorno tropical y contribuir al estudio de ciudades en contextos amazónicos. Se busca adaptar las particularidades del territorio para analizar el papel de los bosques urbanos y los ojos de agua como elementos clave en la implementación del modelo de ciudad esponja. Asimismo, se pretende demostrar la viabilidad y efectividad de este enfoque en la planificación y gestión sostenible de Tarapoto y su entorno. Dado que la ciudad esponja continúa siendo una tendencia actual en el desarrollo urbano, la investigación también considera fundamental incorporar las lecciones aprendidas de experiencias internacionales previas (Zevenbergen, 2018), con el propósito de contextualizarlas y aplicarlas a la realidad amazónica.

MARCO TEÓRICO

Antecedentes teóricos

Estrategias de desarrollo urbano sostenible

El desarrollo de estrategias para mitigar el cambio climático y gestionar el agua en entornos urbanos ha evolucionado de manera constante desde la década de 1960. A lo largo del tiempo, diversos enfoques han sido implementados en distintos contextos urbanos, muchos de los cuales comparten principios con las estrategias asociadas al modelo de ciudad esponja (Leng et al., 2020). Un hito clave en este proceso fue la introducción de las Mejores Prácticas de Gestión (BMP) en los Estados Unidos en 1977 (Deb et al., 2024), lo que marcó el inicio de una expansión progresiva de estas prácticas hacia otros países desarrollados. Este proceso dio lugar a propuestas innovadoras como el Desarrollo de Bajo Impacto (LID), un enfoque que adapta el diseño urbano a las condiciones locales y ha demostrado ser eficaz en la reducción de costos asociados a la gestión de aguas pluviales (Jiang et al., 2024; Eckart et al., 2017). En esta misma línea, la infraestructura verde (GI) se ha consolidado como una estrategia que promueve el uso de elementos naturales (tales como jardines de lluvia, techos verdes y humedales urbanos) para mejorar la calidad ambiental y regular los flujos hídricos (Su et al., 2025; Gunawardena et al., 2017).

En regiones como Australia y Europa, se ha desarrollado el concepto de Diseño Urbano Sensible al Agua (WSUD), que integra la planificación urbana con la protección de

ecosistemas hídricos, incorporando componentes como cuencas, sistemas de biofiltración y humedales (Wu et al., 2023). De forma complementaria, los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS) han incorporado áreas vegetadas y espacios abiertos, no solo para mitigar el riesgo de inundaciones, sino también para fomentar la biodiversidad y la interacción entre la población urbana y la vida silvestre (Song, 2022; Ferrans et al., 2022).

En Asia, específicamente en China, se introdujo en 2013 el modelo de Ciudad Esponja, como una respuesta directa al crecimiento urbano acelerado y los efectos del cambio climático sobre la disponibilidad y calidad del agua (Yang et al., 2022). Este enfoque propone transformar las ciudades en sistemas capaces de absorber, retener y reutilizar el agua de lluvia, contribuyendo a una mejor gestión hídrica, mayor resiliencia ambiental y bienestar urbano (Ariza et al., 2019).

Todas estas estrategias forman parte del enfoque de las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN), que promueve una integración equilibrada entre sostenibilidad ecológica y necesidades humanas mediante la utilización de la infraestructura verde y azul como sistemas de absorción y regulación natural del agua (ONU-Hábitat, 2018; Sangha et al., 2025). La adaptabilidad de este enfoque resulta fundamental para asegurar ciudades más resilientes ante eventos climáticos extremos y para fortalecer su capacidad de mitigación del cambio climático (Song, C. 2022).

Pese a su creciente implementación en Asia y algunos países desarrollados, el modelo de ciudad esponja aún enfrenta limitaciones importantes en regiones como África, donde su aplicación ha sido escasa debido a restricciones institucionales, técnicas y económicas (Thoms & Köster, 2022). Esta situación también se observa en América Latina y en particular en la Amazonía, territorios que, a pesar de contar con condiciones naturales propicias (como abundante vegetación, cuerpos de agua y suelos permeables), no han incorporado aún de forma sistemática estos enfoques en sus políticas urbanas. No obstante, el potencial para implementar estrategias basadas en infraestructura verde y azul en estas regiones es considerable, y podría representar una vía efectiva hacia un desarrollo urbano más sostenible y adaptado al entorno tropical.

Infraestructura verde y azul

13 La infraestructura verde y azul se define como una red interconectada de paisajes naturales y seminaturales que proporciona múltiples beneficios para el bienestar y la calidad de vida de la población. Esta red está compuesta por diversos cuerpos de agua (como lagos, arroyos, ríos y manantiales), así como por áreas verdes, parques, bosques urbanos y zonas de protección ecológica, entre otros elementos (Toledo et al., 2025). Su integración en el entorno urbano no solo favorece la sostenibilidad ambiental, sino que también mejora la biodiversidad, regula el clima local y contribuye a la creación de espacios urbanos más saludables, funcionales y resilientes.

Independientemente de su origen, natural o producto de intervenciones humanas, estos elementos pueden integrarse en distintas escalas del entorno construido, aportando valor ecológico, estético y social (Valente de Macedo et al., 2021). Dentro de esta red, los bosques urbanos y los ojos de agua (manantiales naturales) destacan como componentes fundamentales de la infraestructura verde y azul en muchas ciudades, al actuar como reguladores climáticos naturales y reservorios de biodiversidad (Battermarco et al., 2025).

22 32 En el ámbito urbano, los bosques desempeñan un papel esencial en la mitigación de los efectos del cambio climático, especialmente frente al fenómeno de la isla de calor urbana y la contaminación atmosférica. Sin embargo, debido a su ubicación en zonas cada vez más densamente pobladas, estos ecosistemas presentan una alta vulnerabilidad ante la intervención humana, lo que ha generado procesos acelerados de fragmentación, degradación y deforestación asociados a la expansión urbana (Hellenbrand et al., 2025).

18 El tipo de especie vegetal que compone estos espacios resulta determinante en su capacidad de regulación ambiental. Cada especie presenta características particulares que inciden en su eficiencia para retener agua, mitigar el calor, y contribuir a la estabilidad ecológica (Dong et al., 2025). Algunas especies, por ejemplo, poseen mayor densidad foliar o sistemas radicales más profundos, lo que favorece la infiltración del agua y aumenta la permeabilidad del suelo. Otras especies, en cambio, destacan por su capacidad de generar sombra y crear microclimas urbanos que reducen la temperatura ambiente. Un ejemplo representativo en la Amazonía peruana es la palmera aguaje (*Mauritia flexuosa*), que se caracteriza por su elevada capacidad de almacenamiento hídrico en raíces y suelos, así como por su contribución a la regulación térmica y al equilibrio hídrico del ecosistema en el que se encuentra (Khan., 1991).

Asimismo, en el contexto peruano, los ojos de agua revisten una doble importancia: ecológica y cultural. Estos manantiales naturales han sido tradicionalmente aprovechados para actividades domésticas y son considerados parte del patrimonio local. Su ubicación en áreas con cobertura vegetal les permite funcionar como almacenadores naturales de agua, favoreciendo la biodiversidad y la estabilidad ecológica de sus alrededores (Ponce-Vega., 2015). Sin embargo, al igual que ocurre con los bosques urbanos, los ojos de agua se encuentran cada vez más amenazados por la expansión desordenada de las ciudades, lo que ha conllevado a la disminución de su capacidad de almacenamiento e, incluso, a su desaparición en algunos casos.

Ciudad esponja: fundamentos y evaluación

El concepto de Ciudad Esponja hace referencia a la capacidad de los entornos urbanos para gestionar el agua pluvial a través de procesos naturales como la infiltración, retención, almacenamiento, tratamiento y drenaje controlado. Su implementación requiere la integración de infraestructura verde y azul, junto con sistemas de drenaje urbano sostenibles, con el fin de que la ciudad funcione de manera análoga a una esponja: absorbiendo el exceso de agua durante lluvias intensas y liberándola de forma gradual, ya sea para su reutilización o para su retorno al sistema hidrológico natural. Este enfoque no solo contribuye a la reducción del riesgo de inundaciones, sino que también favorece la recarga de acuíferos, mejora la calidad del agua y promueve un ciclo hidrológico urbano más equilibrado y resiliente (Hamidi et al., 2021). Para facilitar la planificación y supervisión de las intervenciones asociadas al modelo de ciudad esponja, se han desarrollado métodos de evaluación basados en indicadores fijos y dinámicos, los cuales permiten a los planificadores y desarrolladores urbanos optimizar sus diseños y verificar la eficacia de las medidas implementadas en la gestión del agua, así como en la promoción de entornos urbanos más sostenibles (Zhao et al., 2022). Sin embargo, más allá de los aspectos técnicos, es necesario considerar también las percepciones sociales.

Antecedentes metodológicos

Las investigaciones realizadas sobre la evaluación de ciudades esponjas son de carácter multidisciplinario, los métodos tradicionales de detección remota, como imágenes aéreas o datos satelitales, han sido empleados para la evaluación y monitoreo de ciudades piloto.

2 La aplicación de teledetección con drones implica el uso de vehículos aéreos no tripulados para superar las limitaciones asociadas a los métodos tradicionales de teledetección. Los drones ofrecen flexibilidad temporal, alta resolución espacial en la evaluación de bosques urbanos (Banu et al., 2016).

15 Google Earth Engine (GEE) se ha convertido en una herramienta de análisis ampliamente utilizada para gestionar grandes conjuntos de datos geoespaciales en una plataforma en línea basada en la nube porque permite manejar extensos conjuntos de datos con múltiples bandas o características, y proporciona herramientas integradas para el procesamiento de datos espaciales y análisis especializados que funcionan de manera paralela para tareas de análisis espacial. Una ventaja clave es su capacidad para agilizar el proceso de búsqueda, adquisición, extracción y preprocesamiento de grandes cantidades de imágenes de teledetección, lo que facilita la creación, la elaboración, el intercambio y la reproducción de mapas de manera eficiente (Jeong et al., 2023 pp.89).

Este estudio incluirá tecnologías sofisticadas como el SIG mediante ArcGIS, la teledetección con drones y la plataforma Google Earth Engine (GEE) de forma sinérgica. El uso de SIG permitirá un examen más profundo de la sensibilidad ecológica en la zona amazónica. Los drones, por su parte, darán una resolución espacial extraordinaria para analizar los bosques urbanos, superando los límites anteriores. Además, la GEE simplificará el manejo de enormes conjuntos de datos geográficos, permitiendo la extracción eficaz de información crítica. Esta combinación estratégica de técnicas ayudará a la comprensión de la interacción entre la ciudad esponja y la infraestructura verde y azul en el entorno amazónico, ampliando considerablemente los resultados de la investigación.

Formulación del objetivo de la investigación

Proponer y evaluar el concepto de Ciudad Esponja Tropical Amazónica en la ciudad de Tarapoto, integrando el conocimiento ecológico local, las funciones de las infraestructuras naturales y una perspectiva de las soluciones urbanas arraigadas en la realidad local, mediante una evaluación eco hidrológica integral que emplea fotogrametría de alta resolución, análisis geoespacial e indicadores adaptados al contexto tropical.

Formulación de hipótesis

Los ecosistemas naturales urbanos de Tarapoto, como los aguajales y ojos de agua, ofrecen una funcionalidad eco hidrológica más eficaz que la infraestructura urbana convencional, al demostrar una alta capacidad de infiltración y recarga subterránea, así como una notable reducción de la temperatura ambiental, contribuyendo significativamente a la mitigación del cambio climático, la resiliencia urbana y la sostenibilidad territorial en contextos amazónicos tropicales.

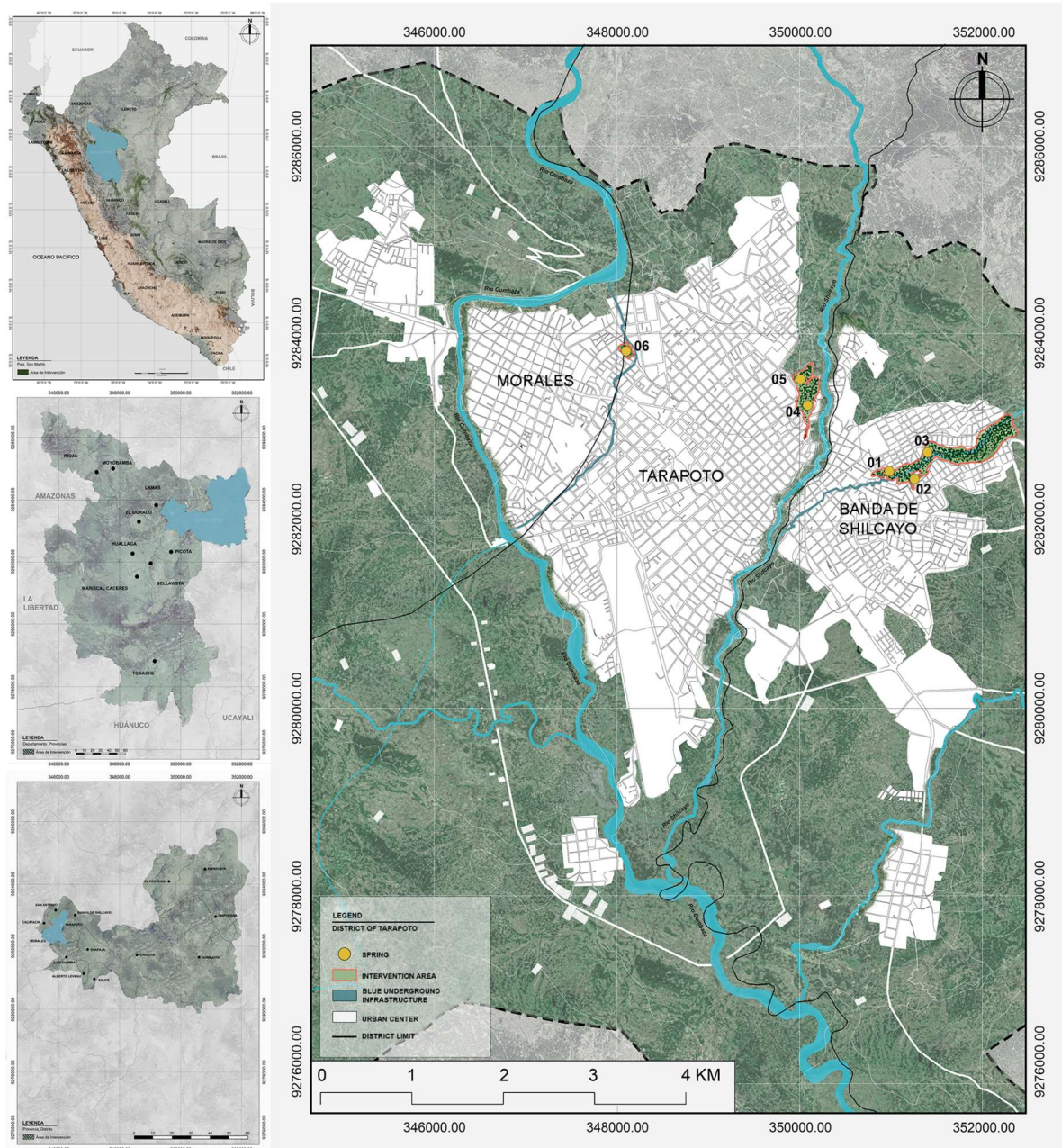
METODOLOGÍA

Lugar de estudio y factores importantes

Tarapoto es una ciudad amazónica tropical ubicada al nororiente del Perú a 356 m.s.n.m, con una población de 152 670 ha (INEI,2017) con una superficie total 60.8 km² entre sus distritos conurbados Morales, Tarapoto y la Banda de Shilcayo (Figura 2). La infraestructura verde y azul está formada por bosques urbanos inundables de palmeras o aguajales (MINAM,2015) y ojos de agua. Las temperaturas de la ciudad de Tarapoto oscilan entre los 23°C y 34°C (SENAMHI,2019). La proximidad a una infraestructura azul mayor como el Río Shilcayo y Cumbaza, así como las microcuencas de las quebradas Choclino y Amorarca contribuyen a la capacidad de absorción y retención de agua del entorno urbano. Los ojos de agua como infraestructura verde y azul son de vital importancia por el espacio físico natural por la predominancia de la vegetación, microclimas, almacenamiento y superficie permeable identificando la ciudad esponja en un contexto amazónico.

Figura 1.

Mapa de Ubicación



Fuente: Elaboración propia.

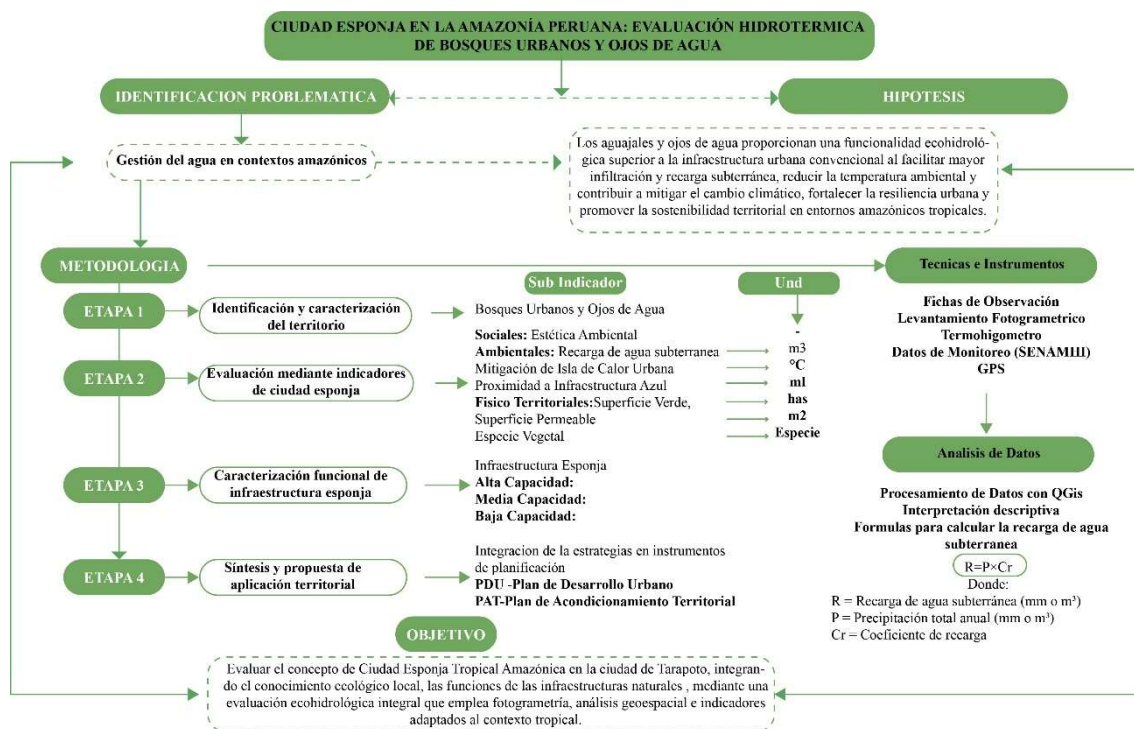
Diseño del estudio

Este estudio utilizó un enfoque cuantitativo para evaluar las características de ciudad esponja en 06 ojos de agua y bosques urbanos en la conurbación de Tarapoto mediante el diseño de estudio de casos cuantitativos. En este estudio se propuso un modelo metodológico para evaluar la infraestructura verde y azul en ciudades de la Amazonía, aplicando el enfoque de ciudad esponja desde una perspectiva eco-hidrológica y urbano-

territorial. El modelo está diseñado para ser adaptable y transferible a diferentes contextos amazónicos, como la ciudad de Tarapoto, y se estructura en cuatro etapas principales: primero la identificación de los sectores con infraestructura verde y azul en el casco urbano conformado por bosques y ojos de agua. La siguiente etapa fue la evaluación mediante indicadores de ciudad esponja, como tercera etapa se realizó la caracterización funcional de espacios esponja y finalmente la síntesis y propuesta de aplicación territorial. Para el procesamiento de análisis de datos se utilizó el geoprocesamiento con SIG (Sistema de Información Geográfica), con los datos obtenidos de levantamiento fotogramétrico, una ortofoto y Modelo Digital de Elevación (MDE) que permitió georreferenciar en QGIS 3.30.

Figura 2.

Flujograma Metodológico



Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de los criterios utilizados para la selección de los casos de estudio permitiendo una evaluación más precisa de la funcionalidad de la ciudad esponja en el contexto amazónico.

Tabla 1: Datos utilizados para la evaluación

Ubicación	Caso 01	Caso 02	Caso 03	Caso 04	Caso 05	Caso 06
Zona Climática	Tropical	Tropica l	Tropical	Tropical	Tropical	Tropica l
Precipitación	1213 mm	1213 mm	1213 mm	1213 mm	1213 mm	1213 mm
Tipos de Suelo	Arenoso Limoso	Arenoso Limoso	Arenoso Limoso	Arcilloso Arenoso Limoso	Arcilloso Arenoso Limoso	Arcilloso o Fino
Coefficiente de Recarga	0.20	0.20	0.20	0.10	0.10	0.30
Topografía	Topografía Accidentada	Poco Accidentado	Topografía Accidentada	Topografía Accidentada	Plana	Poco Accidentado

ETAPA I: Identificación y caracterización del territorio

En esta primera etapa se identificaron los principales componentes de la infraestructura verde y azul del entorno urbano de Tarapoto, centrándose en dos unidades de análisis: los aguajales urbanos y los ojos de agua. Para su reconocimiento y delimitación se empleó fotogrametría aérea con un drone DJI Mavic 3, lo que permitió generar imágenes detalladas del paisaje que permitieron caracterizar la funcionalidad ecológica e hidrotérmica de estos ecosistemas como potenciales infraestructuras de tipo esponja.

ETAPA II: Evaluación mediante indicadores de ciudad esponja

En esta segunda fase se analizó la capacidad funcional de los bosques urbanos y ojos de agua naturales de Tarapoto como sistemas naturales de absorción, regulación y resiliencia hídrica frente a eventos climáticos extremos. El análisis se basó en la adaptación de los lineamientos metodológicos establecidos por el Ministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano-Rural de China (MOHURD), en el marco de la iniciativa de ciudades esponja

(MOHURD., 2014), considerando las particularidades ecológicas y territoriales de la región amazónica. Estas directrices, desarrolladas junto con el Ministerio de Recursos Hídricos (SCP), proporcionan un marco de referencia para la evaluación del desempeño hidrológico urbano, con énfasis en la gestión sostenible del agua y la reducción de riesgos asociados a inundaciones. Además, promueven la implementación de soluciones basadas en la naturaleza (SbN) adaptadas al contexto local, integrando la infraestructura ecológica con el desarrollo urbano, en línea con los principios de sostenibilidad territorial promovidos por la ONU (ONU-Hábitat).

Indicadores de evaluación:

En la Tabla 2 se presenta una recopilación de indicadores de evaluación, junto con sus definiciones y enfoques metodológicos (beneficios sociales, ambientales y Físico-territoriales). Este método se basa en el cálculo de fórmulas empíricas y una descripción cualitativa de acuerdo con las características y disponibilidad de datos en cada estudio de caso (Yu et al., 2023).

Tabla 2: Indicadores de evaluación

Dimensión	Indicadores	Definición	Unidad	Método de Evaluación
Indicadores de beneficios sociales	Estética Ambiental	Integrar áreas verdes en el entorno urbano mejora su estética, generando espacios más funcionales y ambientalmente integrados para el uso cotidiano de la población.	-	Descripción a través de la observación directa
Indicadores de beneficios ambientales	Recarga de aguas subterráneas	Aumento de la recarga de aguas subterráneas por infiltración	m3	Fórmulas empíricas/d descripción cualitativa
	Efecto de isla de calor urbano	Mitigación de efecto de isla de calor urbano con Infraestructura Verde y Azul	°C	Basado en datos de monitoreo/ Descripción a través de la observación directa

	Proximidad de una infraestructura azul	Influencia de ojos de agua por proximidad a un río o quebrada	ml	Descripción a través de la observación directa
Indicadores de beneficios físico-territoriales	Superficies verdes	Extensión de vegetación que se encuentran sobre o cerca de acuíferos subterráneos.	has	Drone DJI mavic 3/Descripción a través de la observación directa
	Superficie permeable	Área que permite la infiltración del agua hacia los acuíferos subterráneos	m2	Drone DJI mavic 3/Descripción a través de la observación directa
	Especie vegetal	Tipo de planta o grupo de plantas que predomina en un área geográfica específica.	Especie	Descripción a través de la observación directa

Fórmulas para evaluar los beneficios ambientales

Para la evaluación de los beneficios ambientales se utilizaron las siguientes fórmulas.

Para calcular la recarga de acuíferos subterráneos

$$R=P \times Cr$$

Donde:

R = Recarga de agua subterránea (mm o m³)

P = Precipitación total anual (mm o m³)

Cr = Coeficiente de recarga

El Coeficiente de recarga por caso de estudio se obtuvo con datos de los tipos de suelo del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI., 2019) el cual está indicado en la Tabla 1

ETAPA III: Clasificación funcional de espacios urbanos

En esta etapa, los espacios evaluados se clasifican de acuerdo con su desempeño como infraestructura esponja, es decir, su capacidad para absorber, regular y almacenar agua en

el entorno urbano. Esta clasificación permite priorizar las actuaciones de conservación, restauración o integración en la planificación territorial.

Tipificación funcional:

- Alta capacidad esponjosa: Corresponde a espacios con una alta capacidad de infiltración y regulación del agua, así como con un alto valor ecosistémico.
- Capacidad media de esponja: Incluye áreas que sirven parcialmente como retención de agua e infiltración. **Depende en gran medida del tipo de vegetación presente, su nivel de conservación y manejo.**
- Baja capacidad de esponja: Se refiere a espacios naturales que han sufrido procesos de degradación ecológica o han sido parcialmente impermeabilizados.

Tabla 3: Clasificación funcional de infraestructura esponja

Función			
SBN	Utilización del agua	Recarga de agua subterránea	Purificación de aguas pluviales
Espacio verde hundido	Baja Capacidad	Alta Capacidad	Relativamente Alta Capacidad
Estanque permeable	Baja Capacidad	Alta Capacidad	Relativamente Alta Capacidad
Pozo de filtración	Baja Capacidad	Alta Capacidad	Relativamente Alta Capacidad
Humedal de agua de lluvia	Alta Capacidad	Baja Capacidad	Alta Capacidad
Zona de amortiguamiento de vegetación	Baja Capacidad	Baja Capacidad	Alta Capacidad

ETAPA IV: Síntesis y propuesta de aplicación territorial

Esta etapa tiene como objetivo integrar **los resultados obtenidos en las fases anteriores en una propuesta concreta de planificación urbana sostenible**. El propósito es que esta metodología pueda ser replicada y aplicada en otras ciudades amazónicas con condiciones similares.

La integración de los hallazgos se propone a través de la incorporación del enfoque de infraestructura esponja **en los principales instrumentos de planificación territorial, tales como:**

- **Plan de Desarrollo Urbano (PDU)**: como herramienta para orientar el crecimiento urbano de manera ordenada, priorizando la conservación de ecosistemas clave.
- **Plan de Acondicionamiento Territorial (PAT)**: para establecer lineamientos de uso del suelo que reconozcan y protejan espacios de alta funcionalidad eco-hidrológica.

RESULTADOS

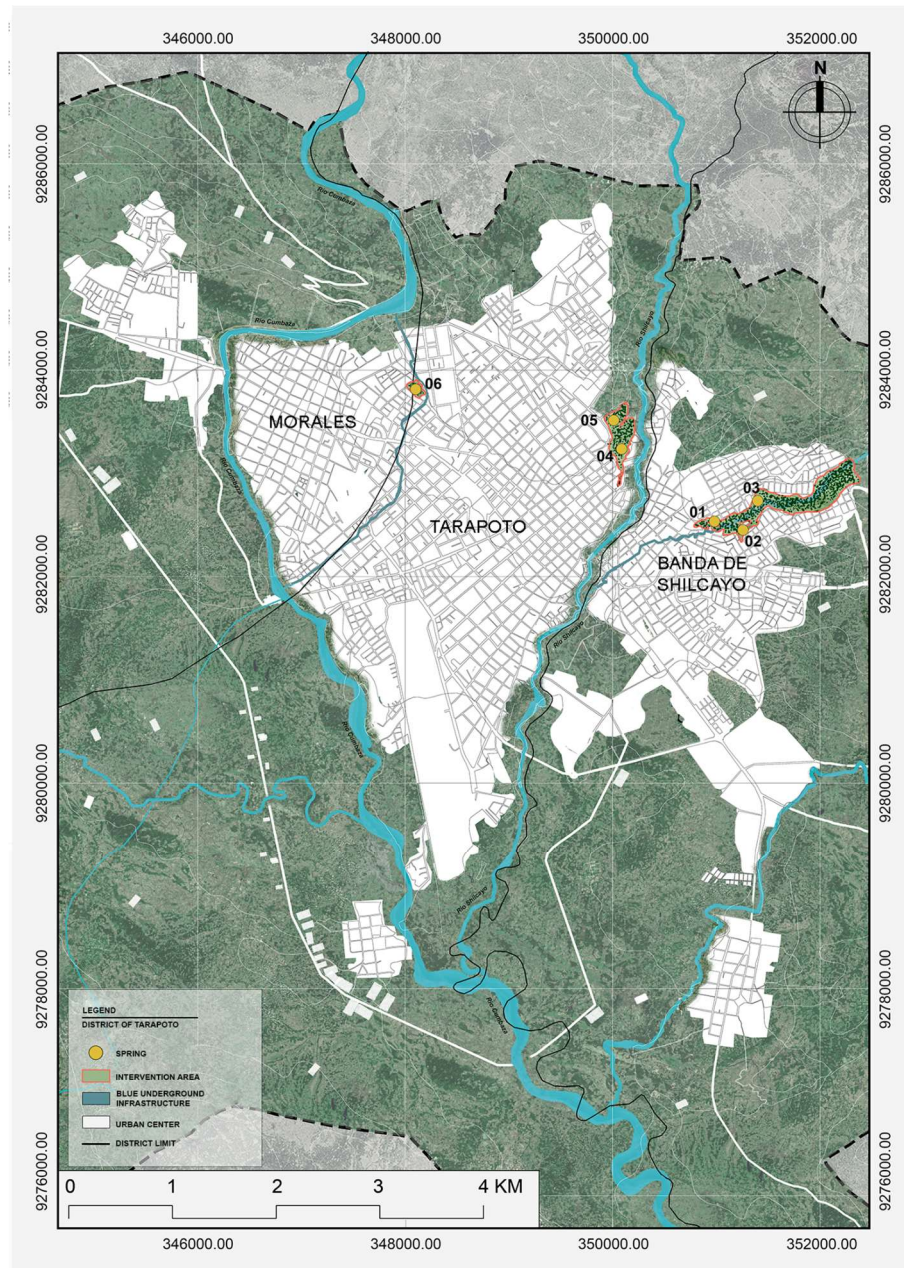
ETAPA I: Identificación y caracterización del territorio

Como parte del proceso de diagnóstico territorial, se llevó a cabo la identificación y caracterización de los principales elementos naturales presentes en el ámbito de estudio. En esta primera etapa, se identificó tres (03) bosques urbanos y seis (06) manantiales naturales, a continuación, se detalla la distribución de estos elementos por distrito:

1. Distrito de La Banda de Shilcayo: Cuenta con un bosque urbano que alberga tres (03) manantiales naturales.
Distrito de Tarapoto: Presenta un bosque urbano conformado por los manantiales naturales Achual y Fondero.
2. Distrito de Morales: Dispone de un bosque urbano que incluye el manantial natural Sachapuquio.

Figura 3.

Mapa de ubicación del sitio de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Para el levantamiento fotogramétrico se utilizó un dron DJI Mavic 3 con sensores de alta resolución, lo que permitió obtener imágenes aéreas georreferenciadas de tres bosques urbanos de la ciudad de Tarapoto. Estas imágenes facilitaron la generación de ortofotos y modelos digitales del terreno, imprescindibles para el análisis de la cobertura vegetal y la delimitación precisa de los cuerpos de agua. Este análisis ha permitido identificar la ubicación de los manantiales y su relación con los ríos, arroyos y aguajales presentes en

la ciudad, proporcionando así una visión más precisa de la dinámica del agua y su interacción con el entorno urbano y natural.

Bosque 01

4 El Bosques 01 abarca 03 ojos de agua se encuentra ubicado en el sector Aguajal, en el distrito de La Banda de Shilcayo, y se caracteriza por poseer la mayor cobertura verde dentro del área de intervención, con una extensión de 3,2202 hectáreas. Este bosque urbano destaca por la presencia predominante de palma amazónica de aguaje (*Mauritia flexuosa*), especie nativa de gran valor ecológico. Gracias a su densa vegetación, la zona presenta una temperatura atmosférica media de 26,6 °C, lo que contribuye a generar un ambiente más fresco y confortable, mitigando eficazmente el efecto de isla de calor urbano. 35 Adicionalmente, se han identificado dos sectores complementarios dentro del mismo entorno forestal: uno con una superficie de 0,49 hectáreas, topografía plana y suelo arenoso viscoso, y otro de 1,45 hectáreas con topografía irregular y suelo arenoso, ambos ubicados en una región de clima tropical. Estas áreas registran una precipitación media anual de 1.213 mm³ y presentan un coeficiente de recarga de 0,20, lo que indica buenas condiciones para la infiltración del agua y el sostenimiento de los manantiales naturales presentes en el bosque.

Figura 4.

Mapa de estudio del Bosque 01



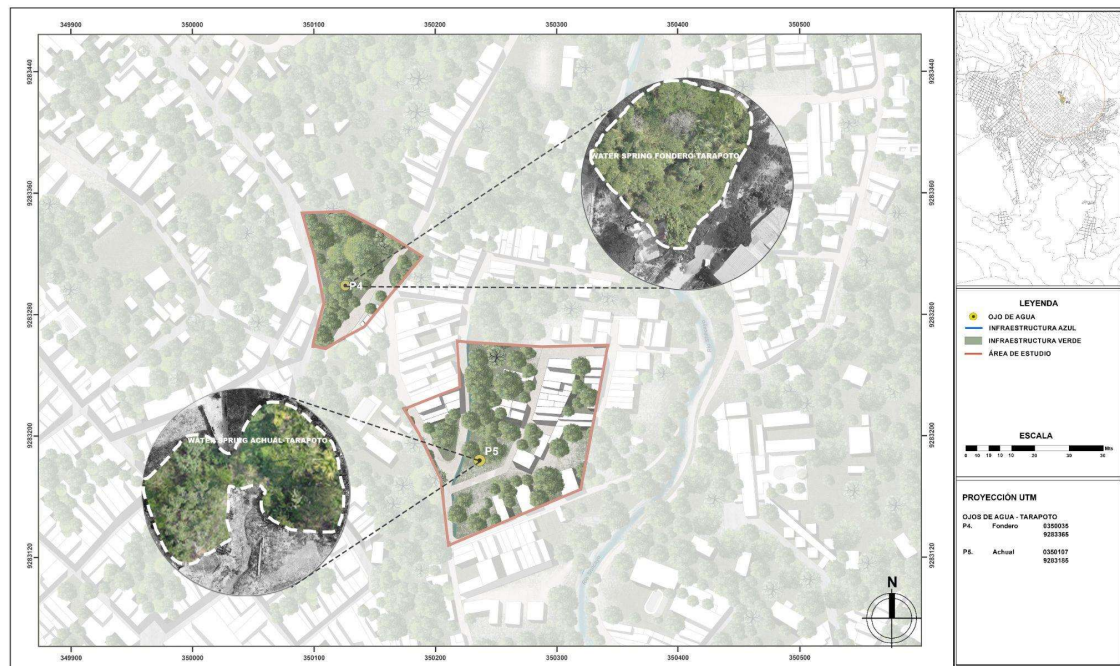
Fuente: Elaboración propia.

Bosque 02

Dentro del distrito de Tarapoto, se ha identificado el Bosque 02, que abarca una superficie total de 0,047 hectáreas, localizado en una zona de clima tropical con una precipitación media anual de 1.213 mm³. El tipo de suelo predominante en este sector presenta una composición arcillosa-arenosa-limosa, con un coeficiente de recarga de 0,10, lo que indica una capacidad de infiltración moderadamente baja. La topografía es accidental, lo cual favorece principalmente los procesos de escorrentía superficial, aunque también permite, en menor grado, la recarga de aguas subterráneas. Estas características reflejan un entorno forestal con funciones limitadas de almacenamiento hídrico, pero que aún desempeña un papel importante en la regulación del microclima y la dinámica hídrica local.

Figura 5.

Mapa de estudio del Bosque 02



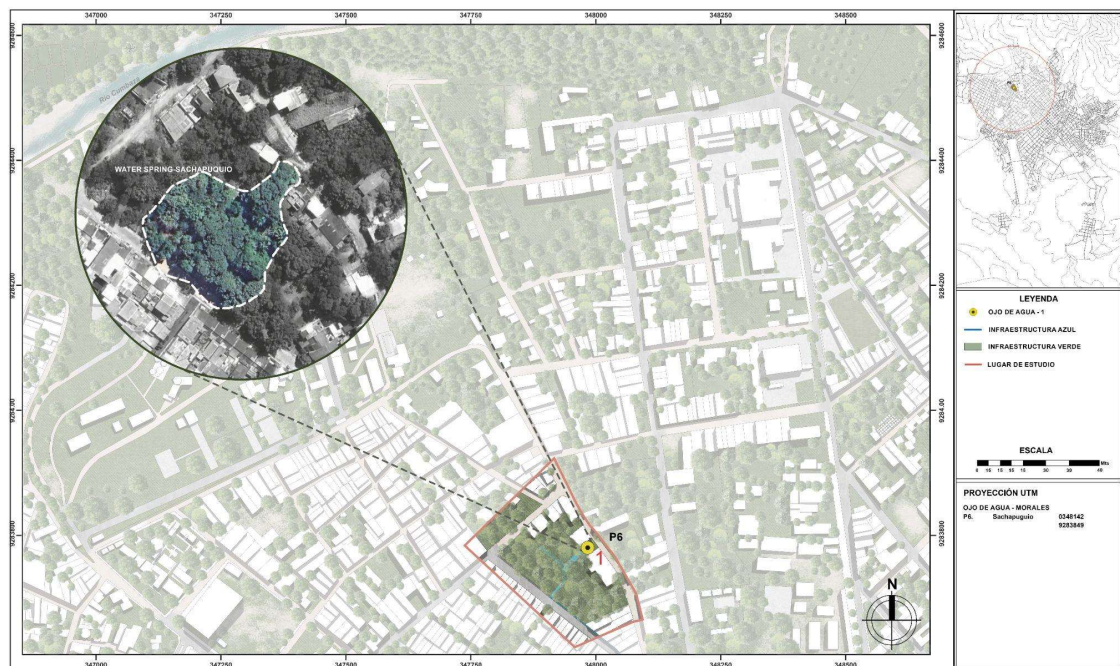
Fuente: Elaboración propia.

Bosque 03

Se ha identificado una superficie forestal de 1,26 hectáreas en una zona de clima tropical, con una precipitación media anual de 1.213 mm³. El suelo, de textura fina y arcillosa, tiene un coeficiente de recarga de 0,30, lo que indica una capacidad de infiltración media-alta. La topografía suavemente ondulada favorece un buen equilibrio entre los arroyos, contribuyendo a la estabilidad hídrica del ecosistema.

Figura 6.

Mapa de estudio del Bosque 03



ETAPA II: Evaluación mediante indicadores de ciudad esponja

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos después de la evaluación de seis ojos de agua naturales, utilizando indicadores adaptados al contexto de una ciudad esponja tropical amazónica. Estos indicadores han sido seleccionados y ajustados para evaluar la capacidad del medio natural en áreas urbanas y periurbanas para absorber, infiltrar, almacenar y regular el agua de lluvia, teniendo en cuenta las particularidades climáticas, edáficas y ecológicas de la región amazónica. Los resultados permiten identificar el potencial de estas zonas para mitigar el riesgo de inundación, mejorar la recarga de agua y contribuir a la resiliencia urbana al cambio climático.

Tabla 4: Resultados de los casos de estudio

Indicadores		Resultados de la evaluación					
		C-01	C-02	C-03	C-04	C-05	C-06
Beneficios Sociales	Estética ambiental	El contraste del agua con la densa	Poca vegetación	Corredor Ecológico	Abundante vegetación	Pérdida de bosques de aguajales	El contraste del agua con la densa

		vegetación					vegetación
Beneficios medioambientales	Recarga de aguas subterráneas	242,6 m3	242,6 m3	242,6 m3	121,30 m3	121,30 m3	363,90 m3
	Mitigación de islas de calor urbanas	26,6 °C	27,7 °C	26,8 °C	27,2 °C	29 °C	28,3 °C
	Proximidad a la infraestructura azul	43,7ml con Barranco Choclino	2.57 ml con Quebrada Choclino	23 ml con Quebrada Choclino	324,52 ml con río Shilcayo	156,25 ml con río Shilcayo	65,6 ml con Quebrada Amorarca
Beneficios Físico-Territoriales	Superficie verde	3.202 hectáreas	0,4910 hectáreas	1,4457 hectáreas	0.04713 Hectáreas	0.4055 Hectáreas	1.052 hectáreas
	Superficie permeable	12500 m2	3250 m2	7456.23 m2	7456.23 m2	650.36 m2	5340.74 m2
	Especies vegetales	Mauritia Flexuosa	Mauritia Flexuosa	Mauritia Flexuosa	Mauritia Flexuosa	Mauritia Flexuosa	Mauritia Flexuosa

ETAPA III: Clasificación funcional de espacios verdes y azules

En la Tabla 5 se presentan los espacios naturales evaluados, los cuales han sido clasificados según su desempeño como infraestructura esponja, es decir, según su capacidad para absorber, regular y almacenar agua en el entorno urbano. Esta clasificación se ha llevado a cabo a partir de un análisis exhaustivo de los datos obtenidos anteriormente (ver Tabla 4), considerando tanto las características ecológicas de cada espacio como su grado de conservación, funcionalidad hídrica y pertinencia territorial.

Tabla 5: Tipificación funcional de espacios verdes esponja

Tipificación funcional					
SBN	Descripción	Categoría de empleo	Bosque 01	Bosque 02	Bosque 03
Espacio verde hundido	Área verde en depresión que acumula escorrentía superficial; vegetación limitada.	Capacidad media de la esponja	X		X
Estanque permeable	Depósito superficial que permite la infiltración directa; Adecuado en contextos urbanos	Capacidad media de la esponja	X		X
Pozo de filtración	Infraestructura que favorezca la recarga de acuíferos; Requiere mantenimiento.	Esponja de alta capacidad	X	X	X
Zona de amortiguamiento de vegetación	Franjas verdes que mitigan el impacto hídrico y térmico cerca de los cuerpos de agua.	Esponja de alta capacidad	X	X	X
Humedal de aguas pluviales	Ecosistema que regula y purifica el agua de escorrentía; vegetación hidrófila.	Esponja de alta capacidad	X	X	X

ETAPA IV: Síntesis y propuesta de aplicación territorial

Luego de la evaluación de los bosques urbanos de aguajales y manantiales ("ojos de agua") en Tarapoto, Morales y Banda de Shilcayo, se consolidan los siguientes lineamientos de planificación urbana sostenible adaptada al contexto amazónico:

1. Integración del enfoque de infraestructura esponja en los instrumentos de planificación:

a) Plan de Desarrollo Urbano (PDU)

1. **Zonificación ecológica prioritaria:** Incorporar mapas de ecosistemas con alta funcionalidad ecohidrológica (aguajales y manantiales) como zonas de protección obligatoria.
2. **Redensificación controlada:** Fomentar el crecimiento urbano hacia áreas de menor valor ecohidrológico para evitar ejercer presión sobre ecosistemas clave.
3. **Corredores ecológicos urbanos:** Crear redes verdes que conecten los bosques urbanos con ríos y arroyos, permitiendo la movilidad de las especies y el manejo natural del agua de lluvia.
4. **Espacios multifuncionales:** Integrar parques urbanos que funcionen como humedales urbanos para la captación, infiltración y almacenamiento de agua.

b) Plan de Acondicionamiento Territorial (PAT)

1. **Lineamientos de uso del suelo:** Designar las áreas de aguajales y manantiales como "suelos de conservación ecohidrológica", limitando su uso a actividades compatibles con su función de esponja (recreación pasiva, educación ambiental).
2. **Normativa sobre superficies permeables:** Exigir un porcentaje mínimo de suelo permeable en las nuevas promociones de viviendas próximas a zonas de alta esponjosidad.
3. **Maapeo de vulnerabilidad:** Incorporar criterios de riesgo de pérdida de infraestructura natural, especialmente ante inundaciones y olas de calor.

DISCUSIÓN

La evaluación de una ciudad esponja en el contexto amazónico de Tarapoto destaca el papel crucial que juegan las infraestructuras verdes y azules, que actúan como esponjas naturales a través de la absorción, almacenamiento y filtrado del agua. Frente a los desafíos del crecimiento urbano acelerado y el cambio climático, los aguajales y manantiales estudiados se destacan como soluciones naturales altamente efectivas.

Bosque Urbano de Aguajales

La expansión urbana y la deforestación son fenómenos que han experimentado los seis casos de estudio de investigación, lo que ha generado consecuencias significativas para la infraestructura verde y azul, de hecho, esta relación es respaldada por estudios previos, como el de (Leng et al. 2020), que señala cómo la rápida expansión de la urbanización ha tenido un impacto considerable en los sistemas hidrológicos y ecológicos naturales.

En el caso de estudio de la conurbación de Tarapoto, los bosques urbanos y los ojos de agua desempeñan un papel esencial como "esponjas naturales". Esta afirmación se fundamenta en los hallazgos de nuestra investigación, con la relación entre la extensión del bosque que está conformada principalmente por la especie (*Mauritia flexuosa* L), comúnmente conocida como Aguajal, sin embargo, (Kahn, F. 1991) afirma que esta palmera se clasifica por dos tipos: aguajales de tierras altas, que se inundan debido a su superficie irregular, y aguajales aluviales, ubicados en zonas ribereñas de ríos y arroyos, esta última se encuentra con mayor frecuencia en extensiones más reducidas, pero con una dispersión más amplia. Además, su capacidad de absorción de agua se alinea con las características particulares del contexto amazónico, respaldando con nuestro estudio, que la amplitud de un bosque muestra una asociación positiva con su capacidad de retención de inundaciones, lo que se conoce como bosque inundable de palmeras o aguajales.

Conectividad de ojos de agua a los ríos y quebradas de la ciudad de Tarapoto.

Los seis ojos de agua se encuentran próximos a los ríos y quebradas de la ciudad, esta característica contribuye a la retención del agua, al tener la capacidad de absorción es una alternativa para el almacenamiento de agua en el entorno urbano. Estos resultados coinciden con el estudio de (Meng et al.2022) donde se proponen a los acuíferos subterráneos urbanos como una estrategia para el concepto de ciudad esponja.

La distancia es un factor que influye en cada caso de estudio, los ojos de agua se encuentran entre 2m como mínimo y 343 m como distancia horizontal máxima. Así como influye en la capacidad de almacenamiento, la temperatura en los bosques también se ve alterada a mayor distancia a cuerpos de agua la temperatura aumenta y a menor distancia la temperatura disminuye. Estos resultados coinciden con la capacidad de los cuerpos de agua de proporcionar enfriamiento a una distancia horizontal de hasta 500 metros, según lo respaldado por investigaciones previas de (Cai et al. 2018).

Los hallazgos de nuestra investigación demuestran que los ojos de agua más próximos a quebradas muestran una mayor capacidad de descarga, como se evidencia en los casos 01, 02, 03 y 06, porque se encuentran a una distancia menor 65 m de las quebradas Choclino y Amorarca. A diferencia de los ojos de agua cerca de ríos tienen una menor capacidad de descarga como en los casos 04 y 05, próximos al Rio Shilcayo que están a una distancia mayor a 100 metros (Fondero y Achual).

Microclimas y efecto de isla de calor urbano en ciudades amazónicas

Los ojos de agua y los bosques urbanos generan microclimas que contribuyen a disminuir el efecto de isla de calor urbano en las ciudades amazónicas. Los aguajales, caracterizados por ser bosques húmedos, poseen la particularidad de crear microclimas en comparación con otras especies vegetales presentes en la región que disminuye -2 °C en su área más cercana a la trama urbana. (Wang et al.2021) en su estudio ha demostrado que estos microclimas son más efectivos cuando se encuentran a distancias de aproximadamente 100 a 300 metros de la zona urbana. Estos hallazgos se respaldan y corroboran con investigaciones previas que han realizado los climas tropicales como el estudio (Banerjee et al.2022) que menciona que la clasificación climática y las características de la vegetación reducen la isla de calor urbano. En la ciudad de Tarapoto los bosques inundables de aguajales son una solución basada en la naturaleza para mitigar el calor de forma natural.

CONCLUSIONES

Esta investigación demuestra que los aguajales y los manantiales naturales sirven como infraestructuras naturales críticas en los entornos urbanos amazónicos, ofreciendo capacidades superiores de regulación térmica y gestión del agua en comparación con las soluciones verdes convencionales. Al validar empíricamente su rendimiento similar al de una esponja, este estudio es pionero en una adaptación amazónica tropical del modelo de la Ciudad Esponja.

Los hallazgos abogan por un cambio urgente en la planificación urbana amazónica hacia marcos ecológicamente integrados que prioricen las soluciones basadas en la naturaleza (SbN). En Tarapoto, los aguajales y los manantiales no son espacios verdes auxiliares, sino elementos fundamentales de la resiliencia climática, la mitigación de inundaciones y la habitabilidad urbana.

La integración efectiva requiere la incorporación de las SbN en los Planes de Desarrollo Urbano (PDU) y los Planes de Acondicionamiento Territorial (PAT), respaldados por una zonificación ecológica detallada e inventarios exhaustivos de los principales activos verdes y azules. Además, exige directrices de diseño urbano específicas para cada contexto que incorporen superficies permeables, drenaje sostenible y áreas verdes multifuncionales, junto con el fortalecimiento de la gobernanza participativa que honre el conocimiento ecológico tradicional.