



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD
INSTITUTO DE ECOLOGÍA
CONTEXTOS URBANOS

*INFRAESTRUCTURAS VERDES FACTIBLES PARA EL MANEJO DE
ESCORRENTÍAS EN LAS ÁREAS VERDES PUBLICAS Y LIGADAS A LA RED VIAL
EN LA MICROCUENCA DEL RÍO TACUBAYA*

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD

PRESENTA:

EDALI YARENI MURILLO GÓMEZ

TUTORA PRINCIPAL:

Mtra. ELENA TUDELA RIVADENEYRA
Facultad de Arquitectura, UNAM

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:

Dra. AMY MICHELLE LERNER

Department of Urban Studies and Planning, University of California, San Diego

Mtro. JUAN ANSBERTO CRUZ GERÓN

Instituto de Ingeniería, UNAM

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, noviembre 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

¡Gracias!

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunidad de continuar mi formación y desarrollo profesional en el Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad. Estoy profundamente agradecida por el apoyo continuo, la educación de calidad y las oportunidades inigualables que esta institución me ha brindado.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico, el cual ha sido fundamental para llevar a cabo este proyecto y para la obtención del grado.

Mi más sincero agradecimiento a mi comité tutor, conformado por la Mtra. Elena Tudela Rivadeneyra, la Dra. Amy Michelle Lerner y el Mtro. Juan Ansberto Cruz Gerón. Su guía experta, paciencia y conocimientos han sido fundamentales en mi camino hacia la culminación de este logro académico.

Además, quiero expresar mi gratitud a todos mis profesores del posgrado, cuyas enseñanzas y orientación han sido invaluable y me han transformado como estudiante y como persona.

Índice

RESUMEN	5
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	9
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	11
OBJETIVOS.....	12
OBJETIVO GENERAL.....	12
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
MARCO CONCEPTUAL.....	13
GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS.....	13
CIUDADES SENSIBLES AL AGUA	15
INFRAESTRUCTURAS VERDES PARA LA GESTIÓN SOCIO-AMBIENTAL DE LA ESCORRENTÍA PLUVIAL	18
ANTECEDENTES	21
AVANCES EN LA IMPLEMENTACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS VERDES EN LA CIUDAD DE MÉXICO	21
REVISIÓN DE LAS HERRAMIENTAS Y MODELOS EXISTENTES PARA LA EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD DE INFRAESTRUCTURAS VERDES	24
METODOLOGÍA.....	27
ÁREA DE ESTUDIO	29
<i>Localización y contexto</i>	<i>29</i>
<i>Precipitación.....</i>	<i>33</i>
<i>Relación lluvia-escurrimiento.....</i>	<i>36</i>
<i>Sistema de drenaje existente</i>	<i>39</i>
<i>Riesgo de inundación, deslizamientos y contaminación.</i>	<i>41</i>
<i>Prospectivas</i>	<i>45</i>
SELECCIÓN DE TIPOLOGÍAS DE INFRAESTRUCTURA VERDE	48
<i>Infraestructuras verdes de retención</i>	<i>51</i>
<i>Infraestructuras verdes de infiltración</i>	<i>54</i>
<i>Infraestructuras verdes de retraso.....</i>	<i>58</i>

<i>Infraestructuras verdes de tratamiento</i>	61
SELECCIÓN DE VARIABLES.....	64
<i>Áreas verdes</i>	64
<i>Zonificación de la cuenca</i>	66
<i>Pendiente</i>	67
<i>Infiltración</i>	68
<i>Nivel freático</i>	70
<i>Proximidad a pozos</i>	72
<i>Zonas de restricción por contaminación</i>	73
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	74
ALGORITMO DE SELECCIÓN DE INFRAESTRUCTURAS VERDES	74
SELECCIÓN DE INFRAESTRUCTURAS VERDES FACTIBLES	78
HERRAMIENTA WEB PARA LA VISUALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	85
CONCLUSIONES	89
BIBLIOGRAFÍA	91
FUENTES DE LOS DATOS.....	96
MANUALES DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE INFRAESTRUCTURAS VERDES.....	96

Índice de figuras

Ilustración 1. Las Ciudades Sensibles al Agua como estrategia de desarrollo urbano integral.....	17
Ilustración 2. Manejo del agua en entornos urbanos mediante infraestructuras verdes.....	18
Ilustración 3. Regionalización del Programa Especial de Infraestructura Verde de la Ciudad de México.	23
Ilustración 4. Esquema de la metodología empleada.	28
Ilustración 5. Contexto territorial de la Microcuenca del Río Tacubaya en mapa 3D.	29
Ilustración 6. Mapa de localización de la microcuenca del Río Tacubaya.....	30
Ilustración 7. Localización de los centros de actividad económica dentro de la Microcuenca del Río Tacubaya	31
Ilustración 8. Localización de la AVA Barranca Tacubaya dentro de la MRT.....	32
Ilustración 9. Localización de las estaciones climatológicas del SMN en la Microcuenca del Río Tacubaya....	33
Ilustración 10. Gráfica de la precipitación media mensual en la MRT.	36
Ilustración 11. Efectos hidrológicos de la urbanización y lámina total de lluvia acumulada en la MRT.....	37
Ilustración 12. Sistema de drenaje urbano en la MRT.....	40
Ilustración 13. Mapa del índice de riesgo de inundación para la Ciudad de México.....	42
Ilustración 14. Mapa del indicador de susceptibilidad por laderas en las AGEBS urbanas de la Cd. de México	43
Ilustración 15. Localización de los antiguos tiraderos de residuos urbanos en Santa Fe.....	44
Ilustración 16. Esquema de perspectivas de manejo de escorrentía en la MRT.....	47
Ilustración 17. Collage de fotografías tomadas durante las visitas y recorridos a proyectos de infraestructura verde en México y Países Bajos.....	49
Ilustración 18. Selección de tipologías de infraestructura verde a partir de las líneas prospectivas de manejo de escorrentías en la MRT.....	50
Ilustración 19. Ficha técnica de plaza de agua.....	52
Ilustración 20. Ficha técnica de laguna de retención.....	53
Ilustración 21. Ficha técnica de suelo esponja.....	54
Ilustración 22. Ficha técnica de jardín microcuenca.....	55
Ilustración 23. Ficha técnica de jardín de lluvia.....	56
Ilustración 24. Ficha técnica de pavimento permeable.....	57
Ilustración 25. Ficha técnica de pozo de infiltración.....	58
Ilustración 26. Ficha técnica de presa filtrante.....	59
Ilustración 27. Ficha técnica de revegetación de laderas.....	60

Ilustración 28. Ficha técnica de zanja-bordo.....	61
Ilustración 29. Ficha técnica de biofiltro	62
Ilustración 30. Ficha técnica de humedal de tratamiento.....	63
Ilustración 31. Mapa de las áreas verdes localizadas en la MRT	64
Ilustración 32. Mapa de zonificación en la MRT.....	66
Ilustración 33. Distribución de la superficie en cada una de las zonas de la MRT.....	66
Ilustración 34. Mapa de los rangos de pendiente en la MRT	67
Ilustración 35. Mapa de las unidades de infiltración en la MRT	68
Ilustración 36. Mapa de curvas de igual profundidad al nivel estático del agua subterránea.....	70
Ilustración 37. Asignación de los rangos de profundidad de agua subterránea	71
Ilustración 38. Mapa de la ubicación de pozos de extracción de agua en la MRT	72
Ilustración 39. Mapa de las áreas restringidas por riesgo de contaminación por lixiviados.....	73
Ilustración 40. Esquema conceptual del proceso de selección de las tipologías factibles.....	76
Ilustración 41. Diagrama de flujo del algoritmo de selección de tipologías factibles	77
Ilustración 42. Gráfica de resultados de la selección de tipologías factibles.....	78
Ilustración 43. Áreas verdes donde resultó factible la implementación de suelo esponja, comparado con las unidades de suelos e infiltración.....	79
Ilustración 44. Áreas verdes donde resultó factible la implementación de pavimento permeable y jardín microcuenca, en la zona aluvial próxima a la planicie lacustre	80
Ilustración 45. Gráfica de asociación de tipologías de infraestructura verde para las áreas verdes en cada una de las zonas de la microcuenca	81
Ilustración 46. Áreas verdes factibles para biofiltros en cuenca media	82
Ilustración 47. Esquema de los elementos que componen la interfaz de la herramienta interactiva para la consulta de infraestructuras verdes factibles en las áreas verdes de la MRT.....	86

Índice de tablas

Tabla 1. Precipitación media mensual en las estaciones climatológicas.....	34
Tabla 2. Indicadores hidrológicos en la MRT.....	38
Tabla 3. Clasificación de Pendientes.....	67
Tabla 4. Matriz de parámetros por tipología de infraestructura verde.....	75

Resumen

Este proyecto tiene por objetivo estimar la factibilidad de implementación de un conjunto de tipologías de infraestructura verde seleccionadas para el manejo de escorrentías de agua pluvial en las áreas verdes públicas y ligadas a la red vial en la Microcuenca del Río Tacubaya.

La selección de infraestructuras verdes se basa en la determinación de variables y parámetros físicos y ambientales que influyen en la construcción y correcto funcionamiento de diversas tipologías de soluciones basadas en la naturaleza, como son la pendiente, la infiltración, la superficie, el nivel freático, la proximidad a pozos, y la restricción en áreas contaminadas. También, se consideran otros aspectos estratégicos derivados del diagnóstico del área de estudio, como la selección de tipologías que contribuyen a controlar inundaciones y deslizamientos en diferentes zonas de la microcuenca.

Para este ejercicio se consultaron diversos manuales de construcción y diseño de infraestructura verde, y se visitaron proyectos en funcionamiento de soluciones basadas en la naturaleza para el manejo de la escorrentía en México y en los Países Bajos, a partir de los cuales se determinaron los aspectos físicos y ambientales críticos que determinan la implementación de diferentes tipologías de infraestructura verde en una zona determinada que se plantea intervenir.

Con esta trabajo, se busca hacer accesible el conocimiento previamente generado desde el sector técnico y académico, para facilitar la consulta de información y orientar la toma de decisiones durante el proceso de planificación de una red de infraestructuras verdes para el control y manejo de escorrentías, haciendo uso de las herramientas computacionales y los sistemas de información geográfica que agilizan el procesamiento de datos y ofrecen un medio para automatizar la evaluación y factibilidad de múltiples alternativas.

Abstract

This project estimates the feasibility of implementing a set of selected green infrastructure typologies for managing stormwater runoff in public green areas and which would be linked to the road network in the Tacubaya River Micro-basin.

The selection of green infrastructures is based on physical and environmental variables and parameters that influence the construction and correct operation of various types of nature-based solutions, such as slope, infiltration, surface, water table, proximity to wells, and the restriction in contaminated areas. Also, other strategic aspects derived from the diagnosis of the study area are considered, such as the selection of typologies that contribute to controlling floods and landslides in different zones of the micro-watershed.

This exercise relies on different construction and design manuals; also, projects functioning with nature-based solutions for runoff management in Mexico and the Netherlands were visited to determine the physical and environmental aspects that are important for the implementation of different types of green infrastructure in each area for intervention.

With this study, the aim is to make knowledge previously generated from the technical and academic sector accessible to facilitate the consultation of information, and guide decision-making during the planning process of a network of green infrastructures for the control and management of runoff. This analysis was facilitated using computer tools and geographic information systems that streamline data processing and offer a means to automate the evaluation and feasibility of multiple alternatives.

Introducción

Actualmente, el manejo del agua de lluvia en la Ciudad de México se sustenta en un sistema centralizado de grandes obras hidráulicas de drenaje combinado que permiten desalojar la escorrentía pluvial y conducirla hasta la cuenca vecina del Río Tula (Ezcurra, Mazari-Hiriart, Pisanty, & Aguilar, 2005). Hoy en día, este sistema de transvase resulta insuficiente para hacer frente a los problemas socioambientales imperantes que demandan soluciones adaptativas para mitigar la escasez de áreas verdes, la pérdida de suelos permeables, la reducción de las tasas de infiltración, las inundaciones, los deslaves, y otras problemáticas que son efecto de una urbanización intensiva y acelerada (González Reynoso, Hernández Muñoz, Perló Cohen, & Zamora Saenz, 2010). Ante la urgencia de hacer frente a estos nuevos retos, existen propuestas que permiten transitar hacia un sistema de gestión integrada del agua pluvial, basada en la integración de la escorrentía al ciclo hidrológico local mediante la implementación de infraestructuras verdes multifuncionales. Ejemplos de estas infraestructuras son las zanjas de infiltración, los pavimentos permeables, los jardines de lluvia, las plazas de agua, los humedales construidos, entre otras muchas tipologías que se implementan en las áreas verdes urbanas, y que tienen la función de retrasar, retener, almacenar y reutilizar el agua de lluvia, y drenarla sólo cuando sea necesario (AEP, 2016, pág. 106).

A pesar de que en la Ciudad de México las áreas verdes públicas son escasas y se encuentran en un estado de deterioro y fragmentación, es posible recuperarlas y potenciar su capacidad al convertirlas en redes de infraestructura verde que maximicen la provisión de servicios ambientales. En este sentido, se lanzó recientemente el *Programa Especial de Infraestructura Verde de la Ciudad de México* que impulsa la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA), el cual tiene como propósito sentar las bases para una estrategia de planeación territorial que incluya la creación de redes interconectadas de infraestructuras verdes en toda la ciudad (Secretaría del Medio Ambiente, 2022). La incorporación de las

infraestructuras verdes dentro de las políticas de desarrollo urbano es un hecho sin precedentes que motiva al sector académico a contribuir con tal propósito, facilitando el acceso a la información que sea útil para orientar la toma de decisiones. Bajo esta premisa, el presente proyecto busca aportar en la creación de una herramienta de selección de infraestructuras verdes orientadas al manejo y control de escorrentías pluviales, que haga uso de los procesos computacionales y los sistemas de información geográfica para determinar la factibilidad de diferentes tipologías de infraestructura verde, a partir de las características físicas y ambientales en un área delimitada. Para este proyecto se definió como área de interés la microcuenca urbana del Río Tacubaya, cuya delimitación se basa en tres criterios principales:

- La microcuenca es la unidad más pequeña del sistema hidrológico en la Cuenca del Valle de México, por lo tanto, es posible observar las particularidades y características diferenciadas en el territorio, con la finalidad de mostrar soluciones de infraestructura verde que respondan a condiciones específicas, especialmente considerando que la Ciudad de México es un territorio extenso y variable en sus condiciones geomorfológicas y climáticas, por lo que el volumen de precipitación y el comportamiento de las escorrentías llega a ser muy diferente de una zona a otra.
- Dado que este proyecto se centró en la selección de infraestructuras para el control de escorrentías, es importante tomar en cuenta los aspectos hidrológicos del espacio como es la definición de las áreas de aporte (cuencas), pues esto define la cantidad, la velocidad y la dirección de los flujos que serán canalizados hacia las infraestructuras verdes para su manejo.
- Es recomendable establecer estrategias de selección de tipologías de infraestructura verde mediante la zonificación de la cuenca alta, media y baja, y definir estrategias de manejo del agua de lluvia para cada zona aprovechando sus características hidrológicas.

En cuanto a su ubicación, la microcuenca urbana del Río Tacubaya es un área de especial interés en términos de manejo de escorrentías, pues además de localizarse en una de las áreas con mayor precipitación de toda la Ciudad de México (de 800 a 1000 mm/año en promedio), también es un área que forma parte de la “Región de Barrancas Urbanas” definido por la SEDEMA. Esta región está conformada por 15 microcuencas adyacentes, donde existen 99 sistemas de barrancas localizadas al poniente de la ciudad. De esta manera, el presente proyecto plantea la posibilidad de funcionar como una prueba inicial que podría replicarse posteriormente para el resto de las barrancas de la región, tras algunas adecuaciones, ya que comparten características físicas y ambientales muy similares.

Pregunta de investigación

Estimar la viabilidad de diferentes tipologías de infraestructura verde para un espacio determinado es un proceso complejo, pues se requiere examinar simultáneamente la influencia de múltiples factores tanto físicos como ambientales que se sobreponen como capas en el territorio. Las herramientas computacionales y los sistemas de información geográfica facilitan el análisis y procesamiento de la información, y ofrecen un medio para automatizar la evaluación de múltiples alternativas. Con base en este planteamiento, se generó la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es la factibilidad de las infraestructuras verdes para el manejo de escorrentías de ser implementadas en las áreas verdes existentes de la microcuenca urbana del Río Tacubaya?

Objetivo General

Evaluar la factibilidad de implementación de infraestructuras verdes para el manejo de escorrentías en las áreas verdes de la microcuenca urbana del Río Tacubaya.

Objetivos específicos

1. Realizar una **caracterización y análisis** de las condiciones actuales del área de estudio en torno al manejo del agua de lluvia y su escorrentía, con la finalidad de **plantear líneas prospectivas** basadas en las necesidades actuales, el contexto y los riesgos presentes.
2. Identificar las diferentes **tipologías de infraestructura verde** para el manejo de escorrentías **con mayor potencial** para intervenir las áreas verdes públicas existentes en la microcuenca del Río Tacubaya, a partir de la **caracterización y análisis del área de estudio**.
3. Definir aquellas **variables y parámetros** del territorio que son determinantes en el funcionamiento de las diferentes tipologías de las infraestructuras verdes identificadas anteriormente, basándose en la **revisión de manuales de diseño y construcción** de infraestructuras verdes para el manejo de escorrentías pluviales.
4. Construir un **algoritmo de selección** que defina las tipologías **con mayor potencial para implementarse** en cada una de las áreas verdes existentes en la zona de estudio, con base en las características territoriales, físicas y ambientales de la microcuenca del Río Tacubaya.
5. Elaborar un **mapa web interactivo que facilite la consulta de los resultados** del algoritmo de selección de tipologías de infraestructura verde aptas para intervenir las áreas verdes en la zona de estudio.

Gestión integrada de los Recursos Hídricos

En la Ciudad de México la gestión del agua de lluvia y su esorrentía se ha identificado como un sistema altamente centralizado orientado a la implementación y desarrollo de grandes obras hidráulicas. Este sistema parte de un paradigma higienista y de control de inundaciones que cobró fuerza ante la creciente concentración urbana del siglo XX, ya que durante esta época se intensificó la demanda de servicios de saneamiento y se tomaron medidas radicales como el entubamiento de ríos, la construcción de presas reguladoras y túneles subterráneos para la expulsión total del agua pluvial hacia otras cuencas (González Reynoso, Hernández Muñoz, Perló Cohen, & Zamora Saenz, 2010). Si bien las medidas hidráulicas han sido eficientes para lograr el control de inundaciones, la expulsión total de la lluvia suprime otros procesos hidrológicos locales importantes, provocando la pérdida de infiltración, la desecación de cuerpos de agua y la pérdida de servicios ambientales fundamentales que sustentan la vida en la ciudad (AEP, 2016). Esta situación requiere de nuevas formas de pensar y gestionar la lluvia, a partir de un enfoque integrado que reconoce las profundas **conexiones e interdependencias entre la gestión del agua, el suelo y el medio ambiente, por lo que deben de gestionarse de manera coordinada con el fin de maximizar el bienestar económico y social de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales** (GWP, 2018).

En este sentido, la Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH) puede entenderse como un modelo que promueve la protección al medio ambiente, el desarrollo sostenible y la participación democrática en la gestión del agua (ibidem). Los fundamentos que subyacen en la GIRH llaman a la adopción de una visión integral y adaptativa desde un enfoque participativo en el manejo del ciclo hídrico, en el que se reconoce la interdependencia entre la gestión del agua, la gestión del

suelo, la gestión de contaminantes y la salud de los ecosistemas. La GIRH tienen su origen en los principios acordados en las Conferencias Internacionales sobre Agua y Medio Ambiente en Dublín 1992 y en Río de Janeiro 1992; estos principios han sido retomados por la Organización de las Naciones Unidas en los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), y acordados por todos los gobiernos que forman parte de la ONU (Global Water Partnership, 2000). Los ODS se consideran fundamentales para lograr un manejo sostenible del agua y los recursos naturales, en especial el Objetivo 6 de la Agenda 2030 que fomenta la gestión sostenible del agua para garantizar su disponibilidad para el presente y el futuro (Naciones Unidas, 2018).

El concepto de la GIRH ha sido adoptado dentro de la política hídrica de diferentes países, entre ellos México, donde se atribuye su cumplimiento a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), quien es la autoridad en materia hídrica con carácter técnico, normativo y consultivo a nivel federal (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 1992). En la Ciudad de México, la autoridad responsable de la gestión y administración del agua es el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), quien adhiere los principios de la GIRH a través de Ley de Agua y Sustentabilidad Hídrica (2017, Artículo 25), y que instruye dentro de los ámbitos de su competencia a la Secretaría de Medio Ambiente (SEDEMA) la integración a las políticas ambientales para la conservación y aprovechamiento sostenible del agua. Además, el enfoque de la GIRH en el contexto de implementación de infraestructuras verdes también requiere de la participación coordinada de otras dependencias de gobierno como son la Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda (SEDUVI) en el ámbito de la planeación urbana, y la Secretaría de Obras y Servicios (SOBSE) para la ejecución de obra pública y servicios urbanos.

Sin bien la estructura sectorizada en nuestro país tiene el objetivo de hacer más eficiente la organización de la administración pública, también puede representar un obstáculo para transitar hacia una visión más integradora y adaptativa de la gestión de la lluvia y su escorrentía como la que se plantea en la GIRH, pues se contradice

a la visión fragmentaria que se refleja en la división de funciones entre diferentes organismos que gestionan de manera separada el agua, el medio ambiente y el espacio urbano. En este sentido, se reconoce que la implementación de infraestructuras verdes, así como la inclusión de la dimensión agua-ecosistema en el manejo de la lluvia y sus escurrimientos puede enfrentar grandes retos para ser reconocida, pues requeriría de cambios operativos que permitan una estrecha colaboración y consenso interinstitucional para lograr la construcción de un plan de acción articulado, así como la inclusión de otros actores de la sociedad civil, organizaciones no gubernamentales y la academia. Bajo esta visión, el presente proyecto reconoce el papel que tiene el sector académico como facilitador de la información y el conocimiento para la toma de decisiones. Por este motivo, la propuesta que aquí se plantea busca ser una herramienta que contribuya a la transferencia del conocimiento a otros sectores no académicos o especializados, y hacerlo de manera sencilla, accesible y comprensible para un público más amplio. Tomando como fundamento la importancia de compartir y socializar el conocimiento técnico y científico mediante herramientas gratuitas, accesibles e innovadoras, como una vía para lograr la construcción de sociedades y entornos más sostenibles.

Ciudades sensibles al agua

El diseño de Ciudades Sensibles al Agua (WSC, por sus siglas en inglés) parte de una concepción urbanística adaptativa, que se fundamenta en la integración de los ciclos hidrológicos naturales y el sistema de extracción, distribución, aprovechamiento, reúso y disposición final del agua en la ciudad, a través de los flujos que componen el ciclo urbano del agua. Este principio se materializa en el territorio mediante la implementación de infraestructuras verdes multifuncionales de manejo del agua y escurrimientos que se integran al espacio público estratégicamente con la finalidad de cerrar ciclos hídricos locales, a la vez que se refuerzan y fomentan conductas sensibles al agua entre la población (AEP, 2016). Bajo la

premisa “retrasar, retener, almacenar y reutilizar, drenar sólo cuando sea necesario” (AEP, 2016, pág. 106) podemos transformar la estrategia de gestión de la lluvia de nuestra ciudad, implementando infraestructuras verdes que modifican el régimen hidráulico actual, donde el agua de lluvia se maneja de forma indiferenciada de las aguas residuales. **No se trata de sustituir el sistema de drenaje existente, sino de darle un mejor destino a la mayor cantidad de agua de lluvia posible.** Desde esta perspectiva, las ciudades son espacios donde **se integran infraestructuras verdes y grises para lograr soluciones preventivas y con visión a largo plazo.** Esto nos permitiría anticiparnos a problemas mayores como son el incremento de la temperatura, el agotamiento de las fuentes subterráneas y la saturación del sistema de drenaje ante eventos de lluvia extrema.

El concepto de Ciudades Sensibles al Agua también puede entenderse como una estrategia para la planificación urbana sostenible, pues busca el mejoramiento del espacio urbano a partir de soluciones de infraestructura verde multipropósito que otorga beneficios en las dimensiones social, ambiental y económica:

- **Beneficios sociales:** la implementación de infraestructuras verdes mejora las condiciones de habitabilidad en las concentraciones urbanas mediante elementos paisajísticos y la provisión de servicios ecosistémicos a la población como áreas de esparcimiento, la compensación del efecto isla de calor, la reducción de la contaminación y la protección ante riesgos hidrometeorológicos (Yu, Li, You, & Xu, 2016; Quiroz Benítez, 2018).
- **Beneficios ambientales:** las infraestructuras verdes permiten la infiltración del agua al subsuelo para la recarga de fuentes subterráneas, y promueven la conservación de espacios verdes dentro de la ciudad que funcionan como conectores de los ecosistemas para dar sustento a la flora y fauna local (Suárez, Camarena, Herrera, & Lot, 2011).
- **Beneficios económicos:** es posible explorar los aportes con el sector privado, especialmente con las inmobiliarias, dado que las zonas cercanas a áreas verdes y a espacios recreativos suelen ser más atractivas para

compradores, también atraen el turismo y los negocios, por lo que representa un incremento en la plusvalía de las zonas donde las infraestructuras verdes se implementan (Quiroz Benítez, 2018; Yu, Li, You, & Xu, 2016).

En conclusión, el diseño de Ciudades Sensibles al Agua es un impulsor que permite obtener el mayor beneficio ambiental, social y económico, por lo que se considera como una forma eficiente de **optimizar los recursos públicos y privados para el mejoramiento de las áreas verdes públicas de la Ciudad de México**. Además, da respuesta a los compromisos pactados en los Objetivos del Desarrollo Sostenible, en particular el Objetivo 11 que llama a los estados a lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras y resilientes (Naciones Unidas, 2018).

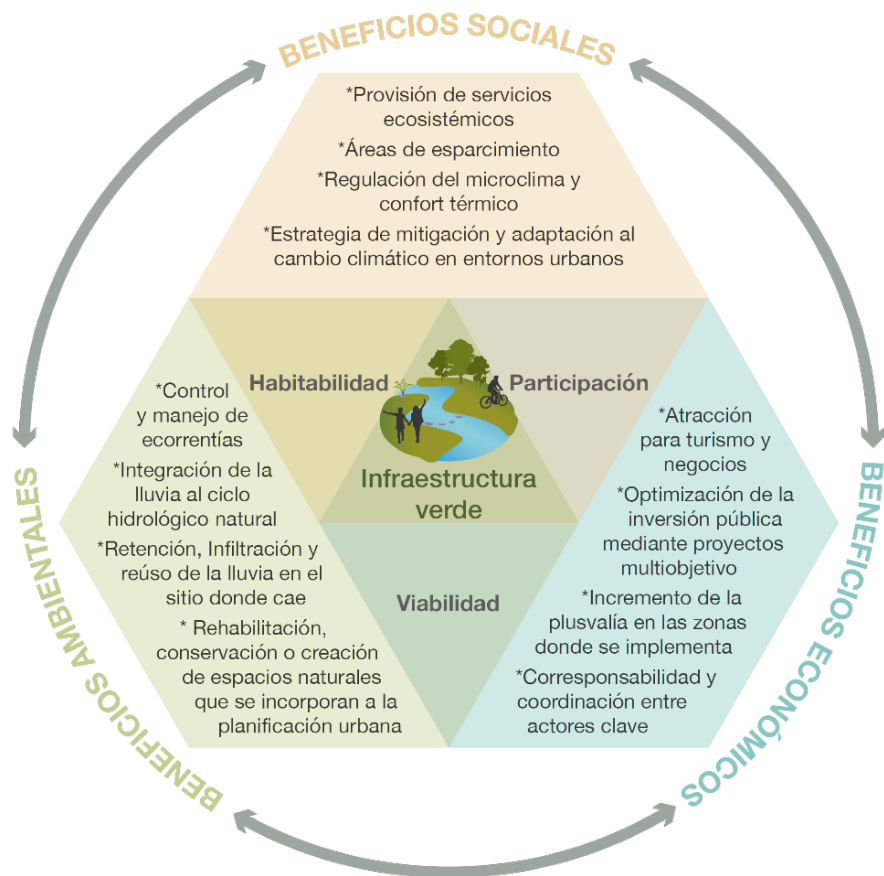


Ilustración 1. Las Ciudades Sensibles al Agua como estrategia de desarrollo urbano integral. Elaboración propia con información de Quiroz Benítez, 2018.

Infraestructuras verdes para la gestión socio-ambiental de la escorrentía pluvial

Las infraestructuras verdes son un conjunto de tipologías diseñadas para cumplir funciones orientadas al manejo y control de la escorrentía urbana mediante el aprovechamiento de los servicios ecosistémicos. Estas infraestructuras también son conocidas como soluciones basadas en la naturaleza (SBN) o como sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS). En ellas se hace uso proactivo de la vegetación y la gestión del suelo, que son aprovechados para retener la lluvia, conducirla, transformarla en vapor y remover la concentración de contaminantes presentes en el agua, la cual pasa a ser parte del ciclo hídrico en el sistema ambiental (WWAP/ONU-Agua, 2018).

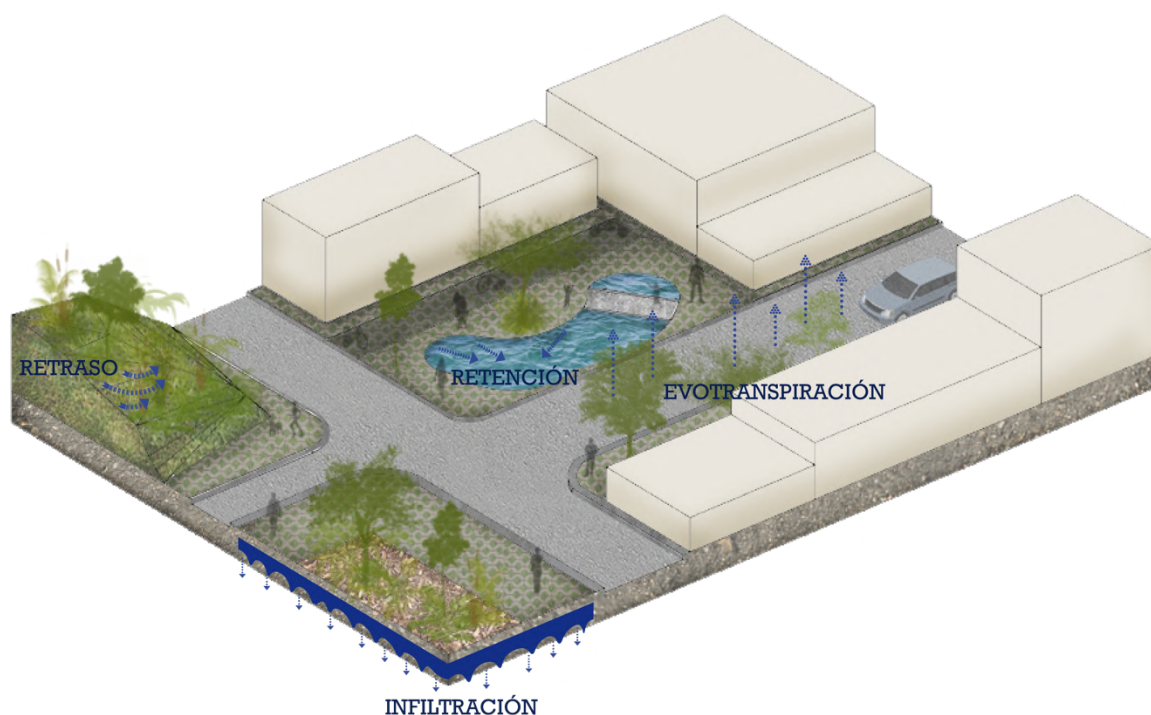


Ilustración 2. Manejo del agua en entornos urbanos mediante infraestructuras verdes. Elaboración propia a partir de esquema en Abellán, 2015.

Existen múltiples tipologías de infraestructura verde que se han desarrollado para cubrir las diferentes necesidades de manejo del agua, y adecuarse a los espacios y

escalas disponibles dentro de la ciudad. A grandes rasgos, las infraestructuras verdes que se destinan principalmente al control y manejo de escorrentías pueden agruparse según sus funciones principales en tres grupos:

- **Retención:** Las que son implementadas para retener o almacenar los flujos y permitir su infiltración, su evaporación, o posterior aprovechamiento (p.ej. suelos esponja, jardines de lluvia, áreas de biorretención, zanjas de infiltración, pozos de infiltración, pavimentos permeables).
- **Retraso:** Las que tienen por objetivo para retrasar la velocidad de las escorrentías para evitar los riesgos de deslaves y erosión (p.ej. terrazas de infiltración, diques en cascada, revegetación de laderas).
- **Tratamiento:** Son las tipologías destinadas a reducir la presencia de contaminantes en el agua para mejorar su calidad, mediante la simbiosis plantas-microorganismos y sus procesos bioquímicos (p.ej. humedales de tratamiento, lagunas de estabilización, zanjas de oxidación, biofiltros, biodigestores, etc.)

Estas diferentes funciones pueden combinarse e interconectarse para trabajar en conjunto mediante una red de infraestructuras verdes que maximice las funciones individuales que cada una podría tener por separado. También, la gran variedad de tipologías hace posible aprovechar casi cualquier espacio de área verde dentro de la ciudad, ya sean espacios muy pequeños ligados a la red vial como camellones o jardineras, o espacios más grandes dentro de parques o plazas que pueden ser intervenidos por una o varias soluciones de infraestructura verde. En este sentido, la distribución y tamaño de las infraestructuras verdes le atribuyen a cada espacio una función específica dentro de la red, la cual está compuesta por tres elementos principales que se conjugan con el espacio urbano: los núcleos, los nodos y los conectores (Secretaría del Medio Ambiente, 2022).

- **Núcleos:** Se consideran espacios amplios que tienen un alto grado de vegetación y buen estado de conservación, muchos de ellos son destinados

a la preservación de los ecosistemas y a la protección de especies nativas, como Áreas Naturales Protegidas, Barrancas, Bosques Urbanos, entre otros.

- **Nodos:** Abarca las áreas verdes que brindan espacios recreativos y públicos al interior de la ciudad, como parques, plazas, jardines, deportivos, alamedas, entre otros. Normalmente tienen un tamaño medio y están destinados principalmente a proporcionar servicios ecosistémicos culturales (FAO, s.f.).
- **Conectores:** son aquellas infraestructuras que facilitan la conexión entre espacios verdes y tienen un carácter lineal que se integra a la vía pública, como camellones, arriates, parques lineales, ciclo-vías, ríos, entre otros. Estos pequeños espacios se pueden articular e interconectar para conducir o canalizar los flujos y mejorar las condiciones de confort para la movilidad no motorizada.

En la Ciudad de México existen aún grandes retos para lograr la creación de redes y corredores de infraestructuras verdes, uno de los temas prioritarios es intervenir y atender las infraestructuras verdes fragmentadas que se encuentran dispersas en la vía pública y que podrían fungir como conectores, pues actualmente su tamaño, su diseño y la falta de mantenimiento no permiten el buen estado de la vegetación, y se ve limitada la calidad de sus funciones ecosistémicas (Calderón-Contreras & Quiroz-Rosas, 2017). En este sentido, el proyecto que aquí se desarrolla tiene como finalidad explorar las **posibilidades de intervención de infraestructuras verdes en pequeñas áreas verdes existentes y ligadas a la red vial**, pues se observa un gran potencial para rehabilitar estos espacios y mejorar sus funciones paisajísticas e hidrológicas. Esto también permite que sean espacios revalorados y se integren como elementos funcionales de regulación térmica, hídrica y de remoción de contaminantes, es decir infraestructuras verdes especialmente enfocadas a proveer servicios ecosistémicos de regulación.

Por último, **la elección de las tipologías de infraestructura verde dentro de una red debe estar basada por un análisis previo de factibilidad que considere las características del entorno para poder determinar si las condiciones físicas y**

ambientales posibilitan su implementación y buen funcionamiento. Algunas de estas variables a considerar son la capacidad de infiltración del suelo, el tamaño de la superficie que se puede intervenir, la pendiente del terreno, o la profundidad del manto freático. Por lo anterior, este proyecto **busca facilitar la consulta de aquellas condicionantes que deben tomarse en cuenta durante la etapa de selección y planificación de las infraestructuras verdes aptas para intervenir las áreas verdes fragmentadas de la Ciudad de México**, partiendo de un área de estudio a manera de proyecto piloto para la exploración de las condicionantes espaciales que influyen en la selección de las tipologías de infraestructura verde más adecuadas al sitio que se planea intervenir.

Antecedentes

Avances en la implementación de infraestructuras verdes en la Ciudad de México

A inicios del año 2022 la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) anunció la puesta en marcha del Programa Especial de Infraestructura Verde de la Ciudad de México (PEIV-CDMX). Este programa público es un instrumento de planeación que define las líneas estratégicas para la construcción de una red de infraestructuras verdes para la ciudad, bajo cuatro principios (Secretaría del Medio Ambiente, 2022):

- **Conectividad:** vincular las áreas verdes a partir de la creación de redes que incorporan y unifican los elementos nodos, núcleos y conectores.
- **Accesibilidad:** aumentar las áreas verdes en la Ciudad de México, con el objetivo de disminuir el acceso desigual a las áreas verdes y hacer que sus beneficios estén al alcance de todas y todos.

- **Funcionalidad:** mejorar el equipamiento y mobiliario de las áreas verdes para mejorar su funcionalidad como espacios recreativos y de mejora para la calidad de vida de sus usuarios.
- **Resiliencia:** mejorar la adaptabilidad de los sistemas urbanos mediante la integración de sistemas naturales que contribuyan a reducir los efectos del cambio ambiental global y local, así como a reducir los riesgos relacionados con el control de inundaciones y manejo de escorrentías.

Mediante estos principios se busca dar paso a la transformación de los espacios verdes existentes para mejorar la provisión de servicios ambientales a la población, a partir de un instrumento de gestión que tiene por objetivo definir los criterios, lineamientos y acciones necesarios para el diseño de una red de infraestructuras verdes. Además, **dentro de las líneas de acción que se perfilan como prioritarias en el programa se encuentra la “conservación de agua y control de escurrimientos superficiales en calles, avenidas y control de escurrimientos en microcuencas”** (SEDEMA, 2022). Esto es un aspecto importante por considerar, especialmente en las áreas de importancia hidrológica para la Ciudad de México, como es el caso de las barranca urbanas.

El PEIV-CDMX propone una regionalización de la Ciudad de México en ocho zonas que surgen de un análisis socio-ambiental, en el cual se determinan las características y problemáticas de cada una (SEDEMA, 2019). En el siguiente mapa se observa la división por regiones, y la localización de la microcuenca del Río Tacubaya que se ubica en la Región de Barrancas Urbanas (2), mientras que la parte baja del área de estudio se inserta dentro de la Región de Áreas Verdes Urbanas Centro Poniente (3). A pesar de que el área que abarca la microcuenca del Río Tacubaya trasciende más allá de una región, es importante tener en cuenta que las características geomorfológicas de este espacio son un aspecto determinante para entender el comportamiento de los escurrimientos pluviales que fluyen de una zona a otra. No obstante, cabe aclarar que la delimitación del área de estudio no se contrapone a la estrategia de regionalización que se plantea en el PEIV-CDMX, por

el contrario, la caracterización de cada región y sus líneas de acción prioritarias forman parte de las estrategias para el manejo de cuencas. En el programa se plantean objetivos claros para el manejo de escorrentías en cada región, por un lado, para la parte media y alta de la cuenca se tiene por objetivo reducir y retrasar los escurrimientos (Región de Barrancas Urbanas), mientras que en las partes bajas (Región de áreas verdes Urbanas Centro Poniente) se busca reducir el riesgo de inundaciones (Secretaría del Medio Ambiente, 2022).

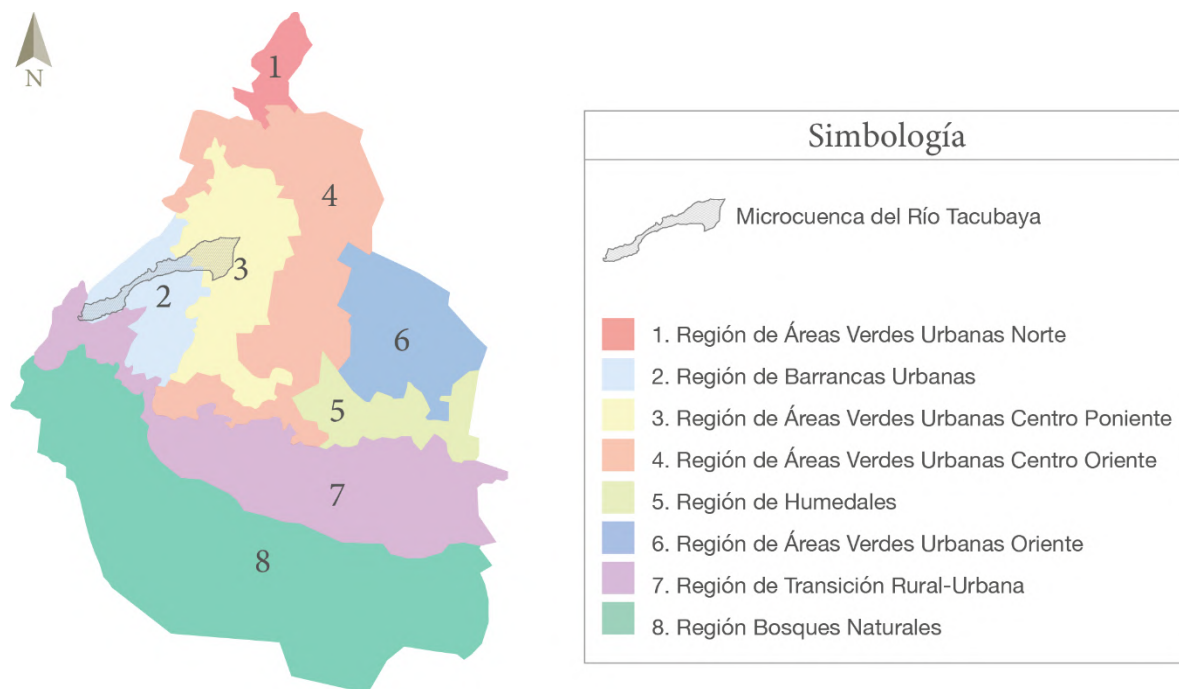


Ilustración 3. Regionalización del Programa Especial de Infraestructura Verde de la Ciudad de México. Elaboración propia con información de la Secretaría del Medio Ambiente, 2022.

En este sentido, este proyecto no toma de forma restrictiva los límites y estrategias por regiones tal como se plantea en el PEIV-CDMX, sino que busca complementarse de tal manera que responda a las necesidades y problemáticas de cada zona para determinar la influencia de los factores hidrológicos e hidráulicos en el manejo de las escorrentías. Por lo tanto, es fundamental para este proyecto aprovechar la coyuntura y voluntad política que abre el PEIV-CDMX para abonar en

la construcción y planeación de la red de infraestructura verde de la Ciudad de México. Por lo que la herramienta aquí propuesta es tan solo el inicio de un proyecto que se plantea replicable para otras microcuencas urbanas, y que facilite el acceso a la información para la toma de decisiones con base en el conocimiento e información técnica y científica que se pone a disposición de otros sectores.

Revisión de las herramientas y modelos existentes para la evaluación de factibilidad de infraestructuras verdes

El primer paso para el desarrollo de un método de selección de tipologías de infraestructura verde fue indagar sobre el estado del arte de las herramientas computacionales análogas, para conocer de qué manera este proyecto puede aportar o complementar los desarrollos actuales. Dentro de la exploración de herramientas existentes se encontró una variedad de plataformas y software desarrollados desde el sector académico y el sector privado para el cálculo y modelación de redes de drenaje. La mayoría de estos programas tiene una orientación clara hacia el sector hidráulico y funcionan como módulos compatibles con el programa SWMM, que es una herramienta gratuita de ingeniería muy utilizada en la planificación de sistemas de drenaje, que fue desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental de Estado Unidos (EPA, s.f.).

No obstante, se observa que la mayor parte de las herramientas existentes van enfocadas a un sector técnico y especializado que demanda soluciones para el agilizar el cálculo de los componentes hidráulicos, o aquellas herramientas que buscan evaluar los criterios de inversión para la optimización de costos. En este sentido, se encontró una oportunidad para elaborar una herramienta de consulta para un grupo de usuarios mucho más amplio, que vaya dirigido a explorar las posibilidades de implementación de infraestructuras verdes durante la etapa inicial de planificación, en la cual es importante considerar las variables territoriales físicas

y ambientales para visualizar aquellas opciones factibles entre un amplia gama de tipologías de soluciones basadas en la naturaleza. Por lo tanto, este trabajo se inserta en una etapa inicial exploratoria y con carácter diagnóstico, pues se basa en el análisis de las condiciones del sitio a intervenir y en ciertos parámetros requeridos para que las tipologías de infraestructura verde funcionen de manera óptima. Una vez que se han seleccionado las tipologías se puede proceder a los pasos siguientes para evaluar el diseño de una red de infraestructura verde, en este caso serían útiles y complementarias las herramientas existentes que permitirán al planificador evaluar la capacidad del sistema para el manejo del caudales, la remoción de contaminantes presentes, así como estimar los costos de su construcción. Los principales programas que se identificaron en la búsqueda se enlistan y describen a continuación:

- **Green Infrastructure Flexible Model (GIFMod):** es un software de código abierto desarrollado para construir modelos conceptuales de infraestructuras verdes que permite predecir su rendimiento hidráulico y evaluar la calidad del agua en un sistema a través de métodos matemáticos. Esta herramienta también permite incorporar datos para realizar simulaciones de diferentes escenarios climáticos e interpretarlos mediante métodos probabilísticos. Se trata de una de las herramientas más completas e innovadoras para evaluar el rendimiento de diferentes tipologías de infraestructura verde en contextos urbanos y agrícolas. A pesar de ser un programa altamente especializado para la ingeniería ofrece una interfaz sencilla y se descarga de manera gratuita, además se pone a disposición la documentación y manuales para entender su funcionamiento (GIFMOD, 2016).
- **OSTRICH-SWMM (herramienta de optimización multiobjetivo para la planificación de infraestructura verde):** es una herramienta de apoyo para la planificación que se incorpora al programa SWMM como un kit de herramientas, mediante el cual se incorporan algoritmos de optimización de

costos para evaluar soluciones de infraestructura verde multiobjetivo (Macro, Matott, Rabideau, Ghodsi, & Zhu, 2019).

- **OSTRICH-SWMM (herramienta de calibración automática):** se trata de un módulo que se integra al programa SWMM para facilitar la calibración automática de modelos de simulación de escorrentías y drenajes urbanos. Esta herramienta inserta docenas de algoritmos de optimización en paralelo para minimizar los errores de simulación de flujo máximo y el volumen total en los sistemas, se desarrolló a partir de un estudio de caso en una cuenca de Buffalo, Nueva York. Esta calibración facilita la incorporación de parámetros asociados a procesos físicos para las cuencas y sus subcuencas, y minimiza algunos errores en la calibración de los modelos de estimación de flujos (Shahed Behrouz, Zhu, Matott, & Rabideau)
- **Climate Resilient City Tool (CRCTool):** es una herramienta web desarrollado por Deltares, que contribuye a la planificación de medidas de adaptativas para encontrar soluciones óptimas de infraestructura verde para las ciudades. Esta herramienta puede estimar el volumen de agua que ciertas infraestructuras pueden manejar a través de diferentes escenarios climáticos, así como los costos de su implementación. Los resultados que proporciona esta herramienta permiten hacer una evaluación cuantitativa que proporciona información útil para la toma de decisiones colaborativas, ya que tiene una interfaz sencilla y accesible para múltiples actores de diferentes áreas y usuarios no especializados (Deltares, s.f.).

La CRCTool se considera una herramienta innovadora en la planificación de infraestructuras verdes, sin embargo, el criterio de selección de las tipologías de infraestructura se basa en el rendimiento del manejo de volumen de agua y los costos. No obstante, se considera que el primer filtro para estimar la factibilidad de ciertas soluciones de infraestructura verde sería precisamente ver cuáles funcionan de acuerdo a las condiciones territoriales y las características de las áreas verdes existentes que se piensan intervenir, una vez que se definen estos criterios de selección se puede valorar su eficiencia,

tanto de costos como del volumen de agua que es posible manejar. Por lo tanto, el planteamiento del presente trabajo parte de estos principios y toma en cuenta que existen otras herramientas que pueden ser complementarias y útiles para diferentes etapas de un mismo proyecto de planeación.

Aunque existe una gran diversidad de modelos de simulación y plataformas de apoyo para la selección de infraestructuras verdes, hasta el momento no se encontró una herramienta que realice las mismas funciones que este proyecto plantea. Por lo tanto, se puede decir que la propuesta aquí desarrollada tiene el potencial de contribuir a agilizar la selección de tipologías de infraestructura verde aptas para intervenir un sitio específico a escala de microcuenca, y que está orientado a las necesidades y contexto de la Ciudad de México partiendo del estudio y comprensión de sus características territoriales.

Metodología

A continuación, se presenta un esquema que busca sintetizar la estructura del proceso metodológico para la selección de tipologías de infraestructura verde aptas para intervenir las áreas verdes públicas y ligadas a la red vial en la Microcuenca del Río Tacubaya. El orden de las etapas se presenta de manera secuenciada y ligada, por lo que los resultados de cada una devienen en los procesos de las etapas subsecuentes. En las secciones posteriores se explicará a detalle el método de análisis y procesamiento de la información de cada etapa, así como las fuentes de los datos que se emplearon.

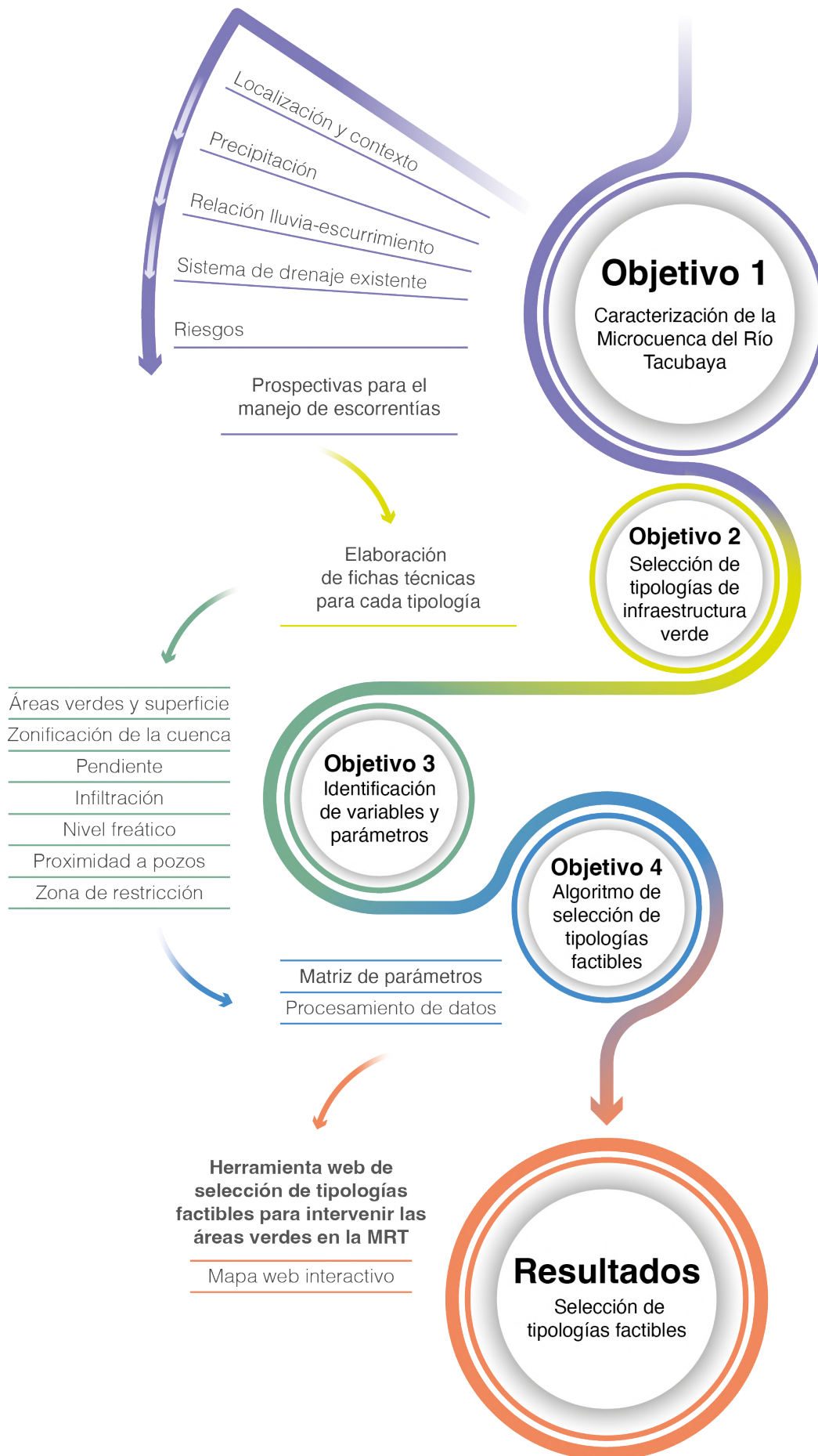


Ilustración 4. Esquema de la metodología empleada. Elaboración propia.

Área de estudio

Localización y contexto

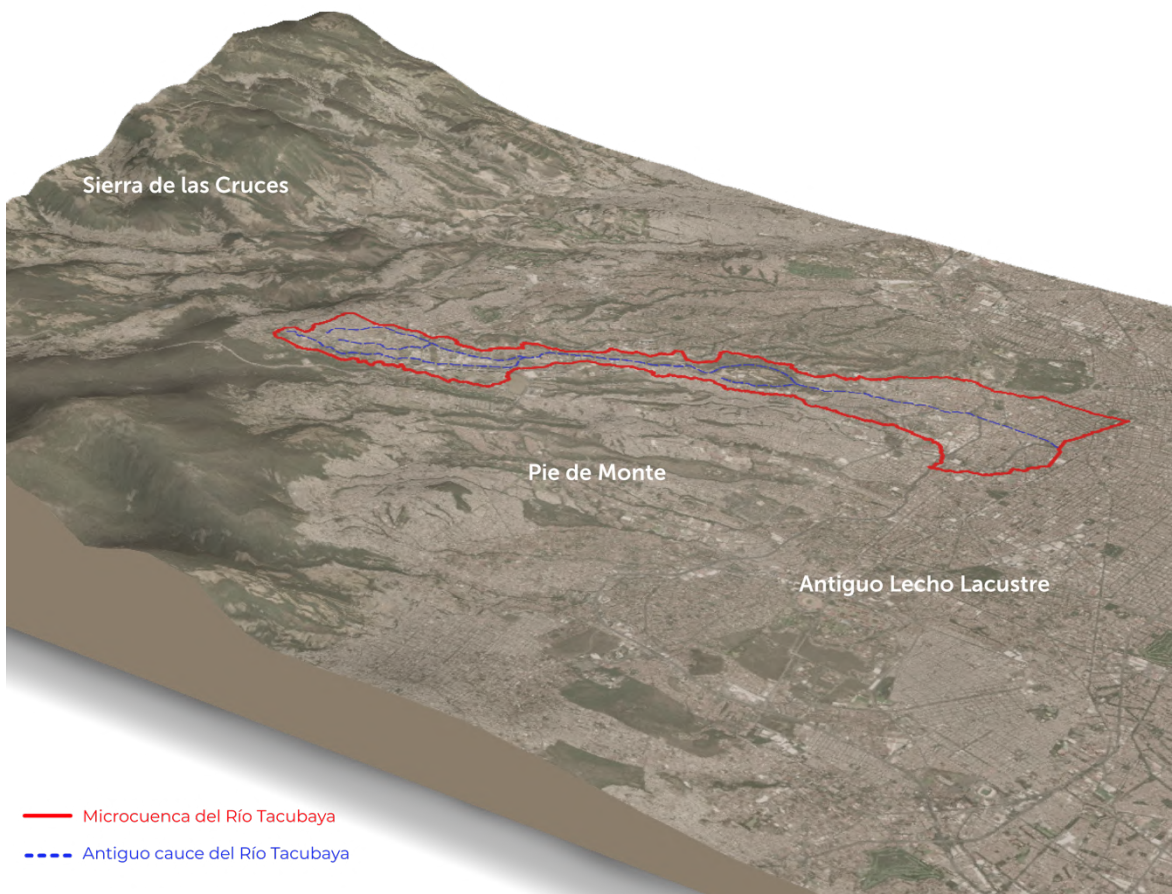


Ilustración 5. Contexto territorial de la Microcuenca del Río Tacubaya en mapa 3D. Elaboración propia.

La Microcuenca del Río Tacubaya (MRT) se localiza al poniente de la Ciudad de México y es parte del Sistema de Barrancas Urbanas que se formaron a partir de los escurrimientos de agua que descendían de la parte montañosa de la Sierra de las Cruces. Esta región de barrancas agrupa 15 microcuencas que son consideradas como áreas importantes para la conservación de las funciones hidrológicas en la Ciudad de México, pues anteriormente aquí corrían los ríos intermitentes que alimentaban el lago de Texcoco. Todas estas corrientes han sido entubadas y son consideradas como ríos extintos, ya que son captados por presas y enviados al sistema de drenaje (Secretaría del Medio Ambiente, 2022). El polígono

que delimita la MRT atraviesa cinco alcaldías: Cuajimalpa, Álvaro Obregón, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc y Benito Juárez. Abarca una **superficie total de 22.07 km²**, cuyos límites se definieron bajo criterios hidrográficos, mediante el cálculo del área de captación y áreas de aporte que alimentaban el cauce principal del Río Tacubaya. Este proceso se realizó con ayuda de la herramienta de simulación de cuencas hidrográficas de la plataforma web del SIATL (INEGI, 2010).

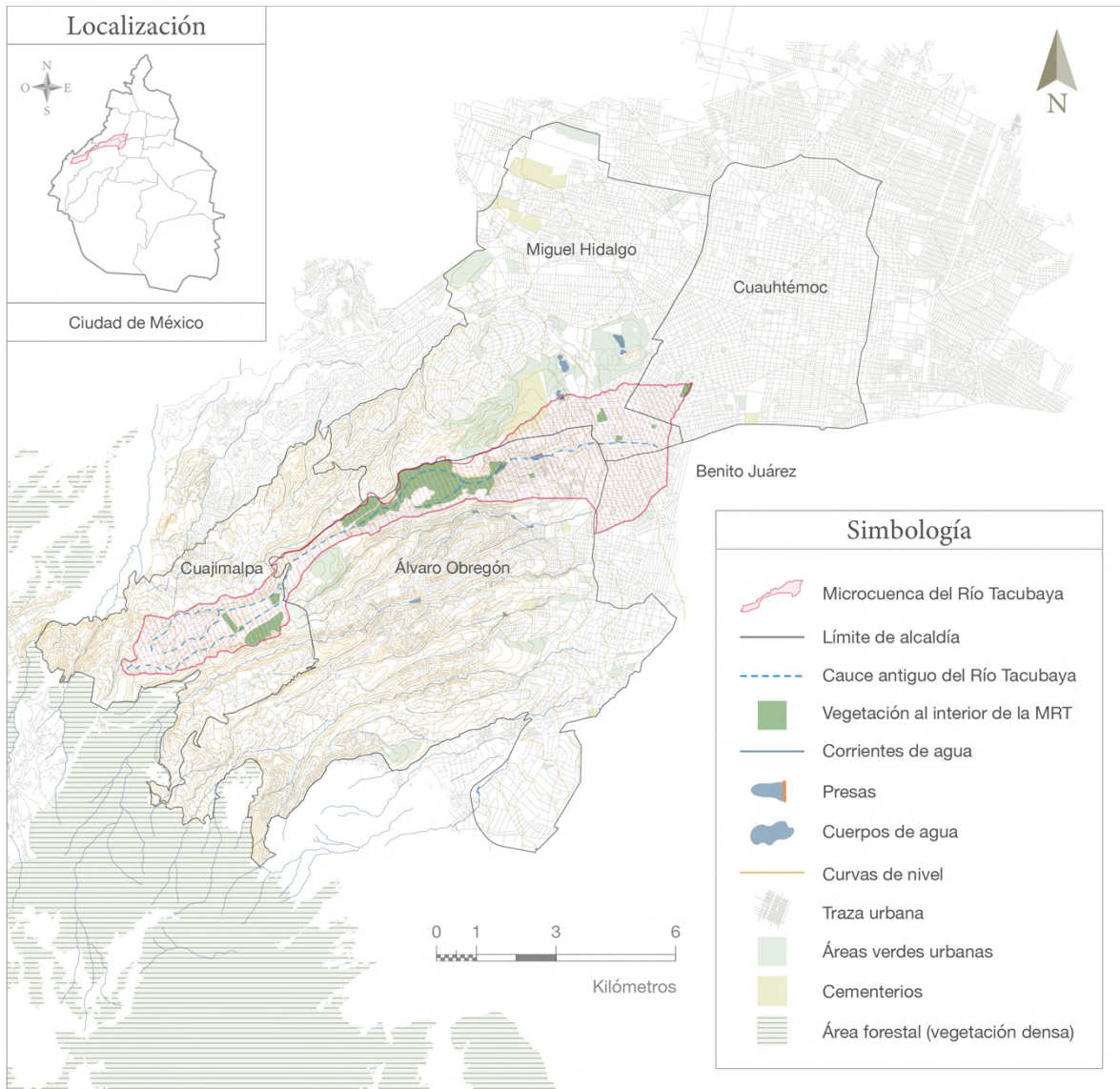


Ilustración 6. Mapa de localización de la microcuenca del Río Tacubaya. Elaboración propia.

La MRT es actualmente un área densamente urbanizada que atrae grandes flujos de personas y conecta puntos de concentración importantes para diversas

actividades económicas de la ciudad como son Observatorio, Tacubaya y Santa Fe. La población total en la MRT asciende a **272,552 habitantes**, esta cifra se obtuvo a partir del Censo de Población y Vivienda 2020 de INEGI integrado con el Marco Geoestadístico. El método de cuantificación de la población se realizó interceptando el área de la cuenca con la capa de manzanas.

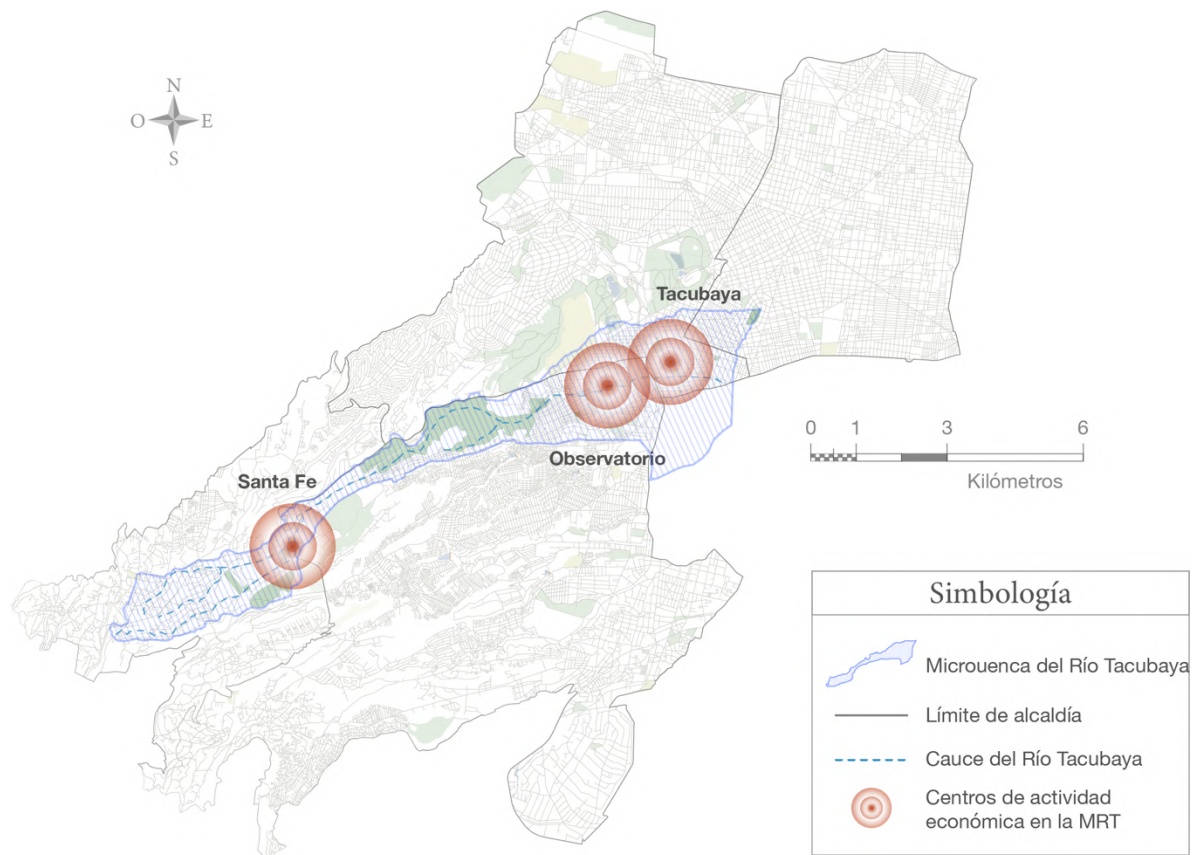


Ilustración 7. Localización de los centros de actividad económica dentro de la Microcuenca del Río Tacubaya. Elaboración propia.

Con respecto a la distribución de los usos de suelo, la microcuenca del Río Tacubaya presenta dos clases principalmente: el suelo urbano que se distribuye en 1,975 hectáreas y representa un 90% del área total de la microcuenca, y la categoría de bosque con 232.23 hectáreas que representa el 10%. Esta información se obtuvo a partir del recorte de la capa de Usos de Suelo y Vegetación 2020 para la Ciudad de México con información de CentroGeo (Instituto de Planeación Democrática y Prospectiva de la Ciudad de México, 2023). Cabe destacar que esta clasificación de

usos de suelo incluye dentro de la categoría de suelo urbano a todas las áreas verdes públicas como parques, camellones y jardineras que forman parte de la traza urbana. Por otro lado, dentro de la categoría de Bosque se encuentra el polígono del Área de Valor Ambiental (AVA) Barranca Tacubaya, ubicada en la parte central de la cuenca. Esta zona es a una depresión geográfica por donde escurría anteriormente el Río Tacubaya antes de ser entubado, y que fue intervenida con la construcción de una presa reguladora para dirigir los escurrimientos de la lluvia al sistema de drenaje subterráneo.

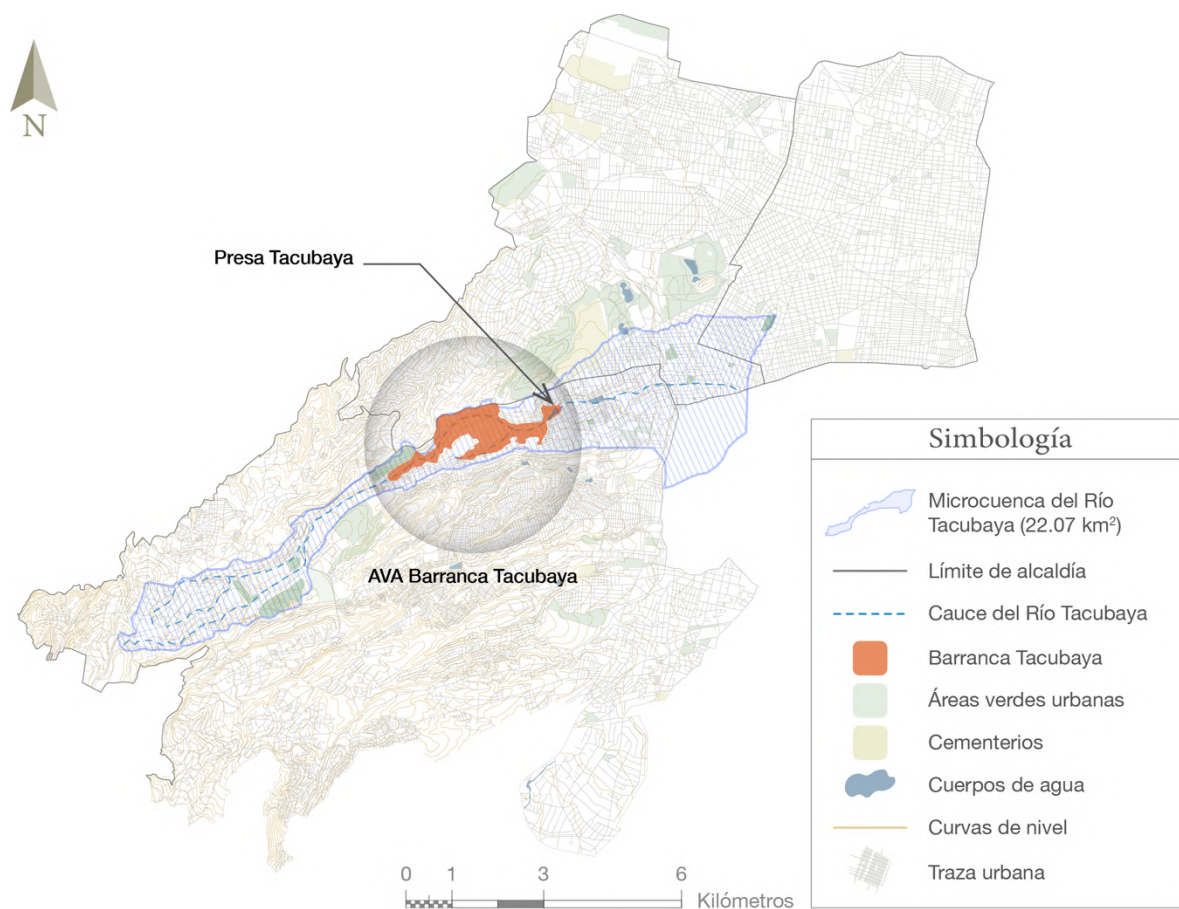


Ilustración 8. Localización de la AVA Barranca Tacubaya dentro de la MRT. Elaboración propia.

Actualmente, la Barranca Tacubaya cuenta con categoría de área de protección y está en proceso de incorporación al Bosque de Chapultepec, esta área abarca una superficie de 133.11 hectáreas. La zona está destinada desde 2019 para convertirse en la cuarta sección del bosque urbano, mediante un proyecto de rehabilitación que

se planea finalizar para el 2023 y que está a cargo del Gobierno de la ciudad de México (Portal de medios de la Presidencia, 2019). Es importante señalar que **el área de la Barranca Tacubaya cuenta con su propio proyecto hidrológico como parte de las obras para incorporarla a la Cuarta Sección del Bosque de Chapultepec, por este motivo el presente proyecto excluye esta zona del análisis, ya que cuenta con una categoría especial de manejo.** Además, se considera importante para este proyecto plantear una estrategia de **atención y rehabilitación a las áreas verdes residuales** que normalmente pasan desapercibidas por su tamaño y segmentación, como camellones, jardineras o pequeños parques. Estos espacios pueden intervenir y transformarse en infraestructuras verdes para el manejo de la lluvia y su escorrentía, y funcionar como conectores de la red de infraestructuras verdes hacia los sitios más grandes.

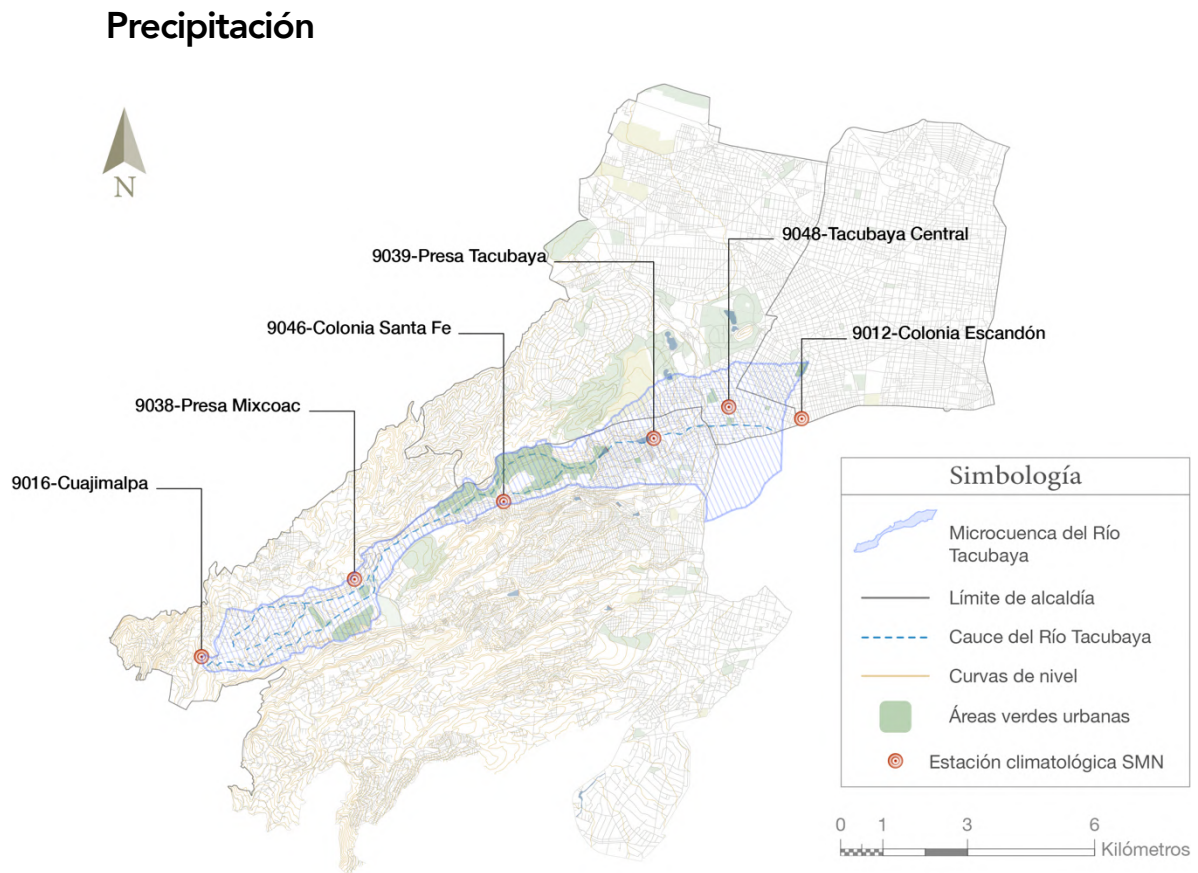


Ilustración 9. Localización de las estaciones climatológicas del SMN en la Microcuenca del Río Tacubaya. Elaboración propia con información de CICESE, 2018.

Para estimar la precipitación que recibe la Microcuenca del Río Tacubaya se revisaron los registros pluviométricos de seis estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) que se encuentran distribuidas a lo largo del área de estudio, de las cuales únicamente la estación 9048-Tacubaya Central se encuentra operando, el resto se mantienen suspendidas. Se revisaron las normales climatológicas de cada estación en el periodo de 1951-2010, de donde se obtuvieron los valores de precipitación mensual y anual, tomando en consideración que se cuenta con un período representativo de al menos 10 años con datos para su cálculo, según la normatividad de la Organización Meteorológica Mundial. La información obtenida se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1. Precipitación media mensual en las estaciones climatológicas. Elaboración propia con información de la plataforma de CLICOM-CICESE, 2018.

Normal de precipitación en estaciones climatológicas dentro de la MRT, período 1951-2010 (mm)												
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	Anual
Estación 9016-Cuajimalpa. Latitud: 19° 21' 00" N / Longitud: 99° 18' 00" W / 2,777 msnm.												
9.6	6.3	11.0	27.3	79.6	216.2	261.5	265.9	212.4	75.1	10.0	8.0	1,182.9
9038-Presa Mixcoac. Latitud: 19° 22' 00" N / Longitud: 99° 16' 00" W / 2,576 msnm.												
10.2	5.5	10.1	25.5	63.4	159.7	205.6	184.8	165.7	65.8	9.8	6.2	912.3
9046-Colonia Santa Fe. Latitud: 19° 23' 00" N / Longitud: 99° 14' 00" W / 2,422 msnm.												
7.5	8.8	14.8	26.7	65.7	176.7	243.0	212.6	162.1	68.7	5.7	8.7	1,001.0
9039-Presa Tacubaya. Latitud: 19° 23' 50" N / Longitud: 99° 12' 45" W / 2,340 msnm.												
11.0	5.4	9.2	24.2	56.8	139.5	189.4	155.0	137.3	58.3	9.0	8.0	803.1
9048-Tacubaya Central (Obs). Latitud: 19° 24' 13" N / Longitud: 99° 11' 46" W / 2,308.6 msnm.												
8.9	3.2	6.7	19.6	40.7	96.4	130.6	126.3	106.3	46.7	7.9	3.9	597.2
9012-Colonia Escandón. Latitud: 19° 24' 05" N / Longitud: 99° 10' 38" W / 2,245 msnm.												
12.2	5.6	9.9	25.3	59.0	133.0	164.5	147.0	131.2	53.4	11.4	5.8	758.3

Vemos que la precipitación se concentra principalmente en cuatro meses de junio a septiembre en todos los registros, indicando que la temporada de lluvias se presenta durante la época de verano. Por otro lado, en el mapa de localización de las estaciones climatológicas se aprecia un reparto regular entre cada estación a través de la cuenca. Por esta razón, se considera admisible calcular la media de precipitación anual y mensual para toda la MRT con el método aritmético, sugerido en el Libro 19 del MAPAS (CONAGUA, 2016), en el que se emplea la ecuación:

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$$

Donde:

\bar{P} = Altura de precipitación media (mm)

n = Número de estaciones en análisis

P_i = Altura de precipitación registrada en la estación i (mm)

Aplicando el método aritmético a los registros obtenemos una **precipitación media anual de 875.8 mm**, que representa la altura de la lámina acumulada de lluvia en la MRT. Si multiplicamos el valor obtenido por la superficie total de la cuenca (22.07 km²) podemos estimar el volumen total de lluvia que recibe la MRT anualmente, lo que resulta en **19,330,900 m³/ año**. Aplicamos la fórmula de cálculo para obtener la media de precipitación mensual y obtenemos los valores representados en la siguiente gráfica.

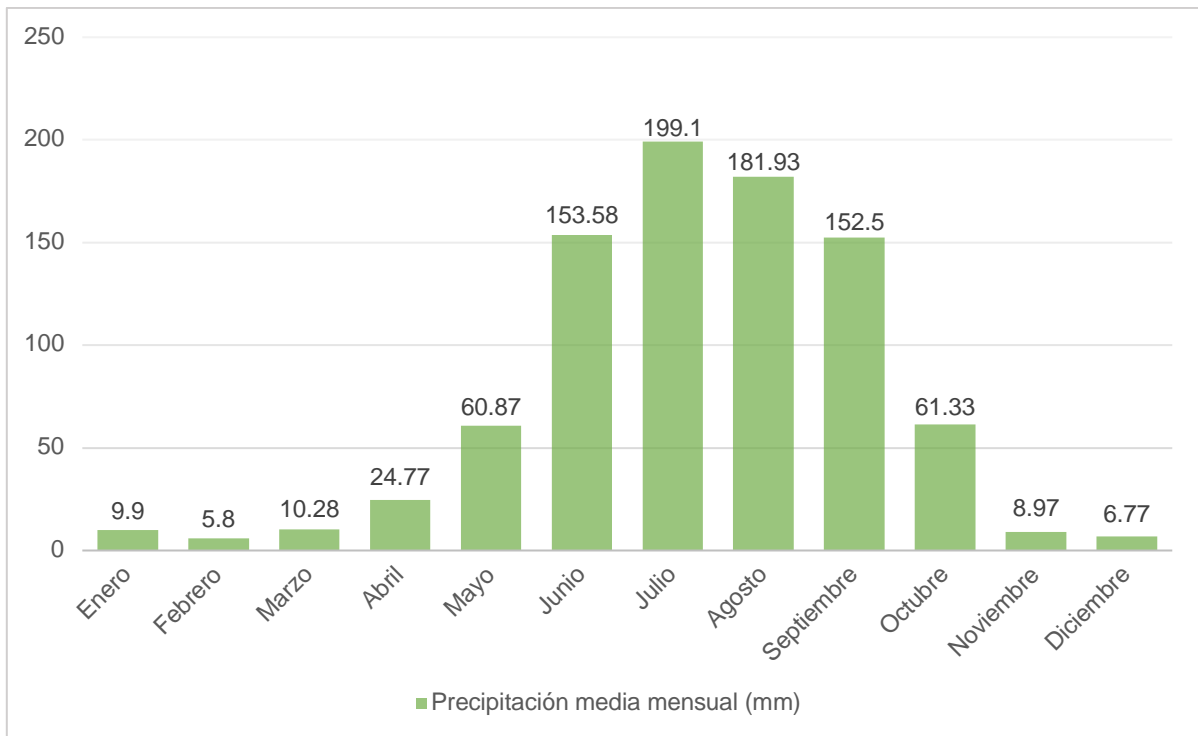


Ilustración 10. Gráfica de la precipitación media mensual en la MRT. Elaboración propia.

Relación lluvia-escurrimiento

Del volumen total de agua proveniente de la precipitación que llega hasta la superficie terrestre una parte puede ser interceptada por la vegetación, edificios, carreteras, retenida en depresiones o charcos, otra parte se evapora y regresa a la atmósfera, o bien se infiltra en el suelo por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares; al resto del agua que fluye sobre la superficie se le denomina escorrentía pluvial (CONAGUA, 2016). La mayor cantidad de agua retenida en el proceso de escurrimiento se da en la vegetación, entre más densa sea la cobertura vegetal en el suelo, mayor será la atenuación del flujo en la escorrentía. En este sentido, el crecimiento urbano y los cambios de uso de suelo tienen importantes efectos hidrológicos que debemos considerar para el manejo del agua de lluvia en la MRT, la cual se encuentra mayormente urbanizada. Entre los principales efectos observados en el área de estudio destaca una disminución en la infiltración, el aumento del escurrimiento y la contaminación de la lluvia por hidrocarburos.

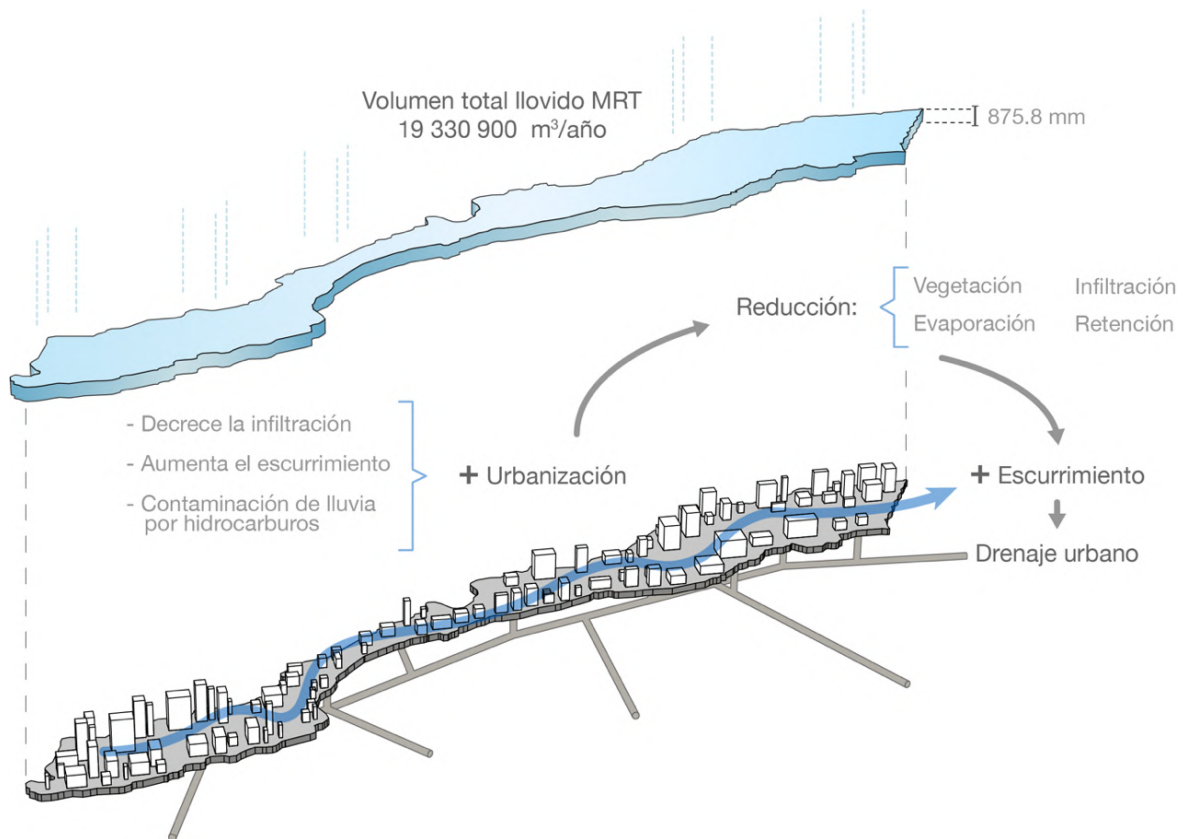


Ilustración 11. Efectos hidrológicos de la urbanización y lámina total de lluvia acumulada en la MRT. Elaboración propia.

A través de las herramientas de análisis del simulador SIATL, se determinó el área de escurrimiento del Río Tacubaya desde la intersección de la línea del cauce principal con el Río de la Piedad (ahora Viaducto), y a partir de este punto se obtuvo la superficie de área drenada flujo arriba. Una vez que se definió la superficie que abarca esta microcuenca, se descargó el polígono en formato vectorial junto con el trazo de la red hidrográfica correspondiente y su cauce principal. Posteriormente, se procesaron las capas vectoriales en el software QGIS y se calculó el área del polígono de la microcuenca, obteniendo un total de 22.07 km². De igual forma, se obtuvo la longitud del cauce principal desde las herramientas de cálculo de QGIS, dando un total de 15.473 km.

Otros indicadores de escurrimiento como el tiempo de concentración, la pendiente media y el caudal pico se obtuvieron mediante la calculadora de gastos de la plataforma SIATL, con la cual se realizó una estimación del caudal máximo

considerando un tiempo de retorno de 5 y 10 años, y un coeficiente de escurrimiento de 0.75 que corresponde a zonas urbanas (Campos-Aranda, 2010, citado en CONAGUA, 2016). El modelo de la herramienta de cálculo en el SIATL emplea la fórmula racional americana, por lo que se consideran los escurrimientos en condiciones naturales (Dirección General de Geografía y Medio Ambiente, INEGI, s.f.). Por este motivo los resultados deben de considerarse a revisión, pues la MRT es un área urbana intervenida por infraestructura de drenaje construido que altera el comportamiento del agua. El resultado de los indicadores hidrológicos y sus parámetros se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2. Indicadores hidrológicos en la MRT. Elaboración propia.

Indicador	Valor	Fuente
Superficie de la microcuenca	22.07 km ²	Procesamiento de las capas vectoriales en QGIS
Longitud del cauce principal	15.47 km	
Elevación máxima	2763 msnm	Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas (SIATL, 2021)
Elevación media	2501 msnm	
Elevación mínima	2240 msnm	
Pendiente media	3.39%	
Tiempo de concentración	117.80 (min)	
Coeficiente de escurrimiento (zona urbana)	0.75	Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (CONAGUA, 2016)
Periodo de retorno de 5 años		
Precipitación efectiva	16.55 mm	Base de datos CLICOM (CICESE, 2018)
Intensidad de lluvia	8.44 mm/h	Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas (SIATL, 2021)
Caudal pico	33.37 m ³ /s	
Periodo de retorno de 10 años		
Precipitación efectiva	25 mm	Base de datos CLICOM (CICESE, 2018)
Intensidad de lluvia	12.76 mm/h	Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas (SIATL, 2021)
Caudal pico	50.46 m ³ /s	

Sistema de drenaje existente

El cauce del Río Tacubaya fue intervenido en la década de 1930 durante la oleada de entubamiento de ríos en la Ciudad de México a raíz de la expansión acelerada de la mancha urbana. El crecimiento urbano dio origen a la modificación de 25 ríos al poniente del Valle de México para incorporarlos al sistema de drenaje mediante la construcción de 27 presas interconectadas por túneles, a manera de vasos comunicantes (Sacmex, 2012; González Reynoso, Hernández Muñoz, Perló Cohen, & Zamora Saenz, 2010). Este sistema de presas del poniente transfiere las aguas pluviales y residuales combinadas hacia el Interceptor Poniente, un túnel de drenaje de 16.56 km de longitud y 4 metros de diámetro, con capacidad de conducción de 25 m³ por segundo que fue construido en 1962 (SACMEX, 2018). Posteriormente, el Interceptor Poniente dirige las descargas de los escurrimientos hacia el vaso regulador “El Cristo” ubicado en Naucalpan, Estado de México; a partir de este punto, las aguas son conducidas por el Túnel Emisor Poniente II hasta el municipio de Tula en el estado de Hidalgo (SACMEX, 2018).

Dentro de la MRT, se encuentra la Presa Tacubaya con 300,000 m³ de capacidad, cuya infraestructura es operada por SACMEX. La Presa Tacubaya está interconectada por túneles con la Presa Becerra “C” al sur, y del lado norte se conecta con Tecamachalco, dichos conductos operan al 50% de su capacidad por la acumulación de azolve (SACMEX, 2017). La localización de las presas e infraestructura de drenaje en la MRT pueden apreciarse en el siguiente mapa. También se puede observar que convergen dos sistemas de drenaje de diferentes escalas en el área de estudio, a nivel local la red primaria de alcantarillado que cumple la función de drenar el área de la cuenca y dar servicio de drenaje sanitario a la población local. Por otro lado, está la red de drenaje general a escala metropolitana, que para el caso de la MRT está compuesta por el Interceptor Poniente, el vaso regulador “El Cristo” y el Túnel Emisor Poniente II como infraestructuras principales, las cuales reciben la aportación de toda el área que comprende el sistema de presas del poniente.

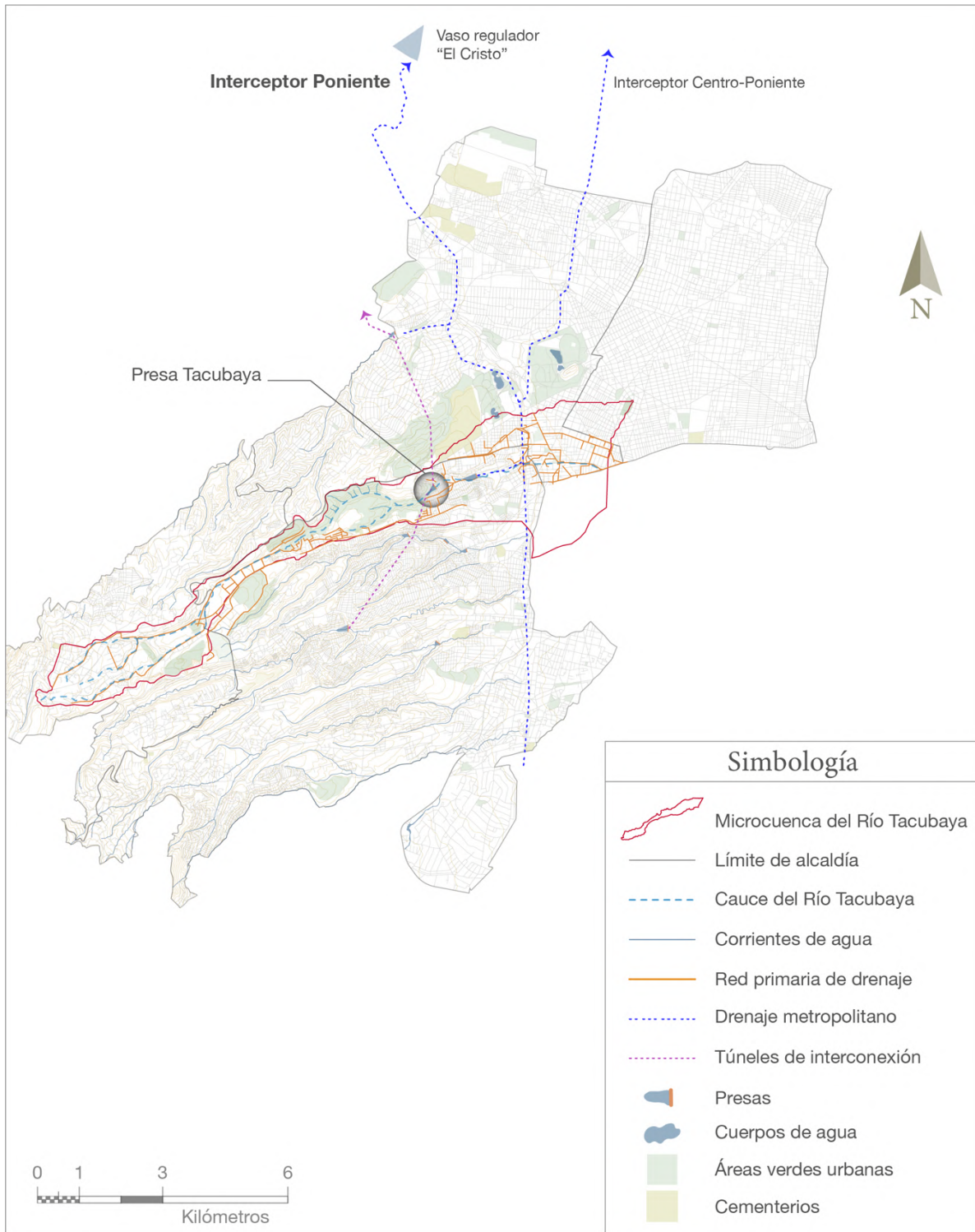


Ilustración 12. Sistema de drenaje urbano en la MRT. Elaboración propia con información de GeoComunes, 2015.

Riesgo de inundación, deslizamientos y contaminación.

Se observa que la MRT en las condiciones actuales presenta un comportamiento hidrológico de alto escurrimiento superficial y baja retención de agua, además de la pérdida de infiltración al subsuelo. Lo anterior se debe principalmente a la intensa urbanización que socava la hidrología del suelo, ocasionando que las precipitaciones se desvíen al flujo superficial y sean captadas por las infraestructuras de desagüe que en ocasiones sobrepasa su capacidad, provocando inundaciones durante las lluvias más severas. Además, se calcula que la infraestructura de desalajo a escala local (red primaria) en la Ciudad de México tiene una antigüedad de más de 30 años (CONAGUA, 2016), un problema que podría comprometer su funcionamiento por la pérdida de vida útil y disminuir el nivel de protección contra inundaciones, situación que se agrava cuando irrumpen eventos de precipitación extrema, mismos que han dado lugar a inundaciones en diferentes zonas del área de estudio (SACMEX, 2018; Gómez Flores, Cruz Flores, Servín Vega, & Chávez González, 2016).

En el siguiente mapa se muestran el análisis del índice de riesgo de inundaciones de CONAGUA para un periodo de retorno de 5 años, en donde se calcula el porcentaje de área inundable por AGEB en la Ciudad de México, y se clasifica en cinco niveles de peligro por riesgos hidrometeorológicos. Esta información se obtuvo a partir de la capa vectorial del Atlas de Riesgos de la Ciudad de México a través del portal de datos abiertos (Portal de datos abiertos, 2023), con información proporcionada por la Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil. En el mapa se observa que el aumento de las escorrentías acarrea problemas mayores en las partes bajas de la MRT provocando inundaciones, especialmente el riesgo aumenta en las colonias Tacubaya, Escandón, Hipódromo y Nápoles, que se ubican justamente en el área limítrofe donde comenzaba el lago de Texcoco.

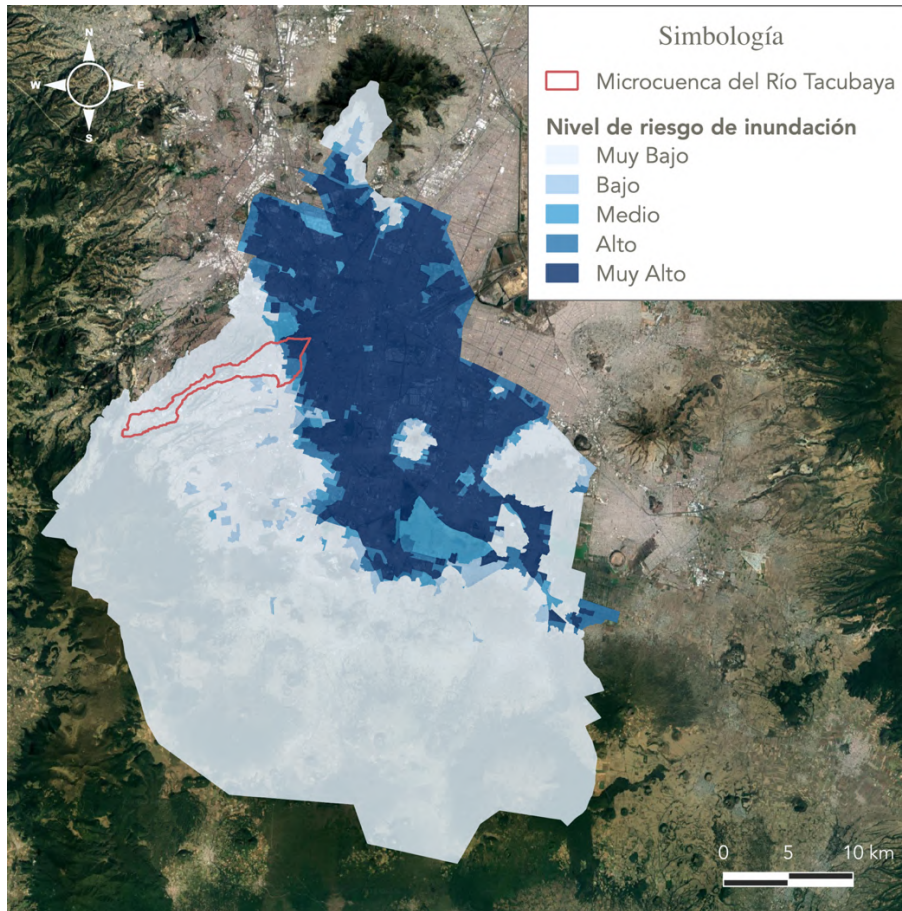


Ilustración 13. Mapa del índice de riesgo de inundación para la Ciudad de México. Elaboración propia con información del Portal de Datos Abiertos, 2023.

Mientras que en las partes bajas de la MRT las precipitaciones intensas provocan anegaciones y encharcamientos, en las partes más altas de la microcuenca los fenómenos hidrometeorológicos convergen con fenómenos geológicos, pues la presencia de pendientes pronunciadas aumenta el riesgo de deslizamientos en laderas y la erosión del suelo. La tasa de ocurrencia de deslizamientos de tierra aumenta significativamente durante la temporada de lluvias debido a la acción de arrastre de las escorrentías durante las tormentas. En el siguiente mapa se muestra el indicador de susceptibilidad por laderas del Atlas de riesgos de la Ciudad de México, con información de la base de datos descargada del Portal de Datos Abiertos (Portal de Datos Abiertos de la Ciudad de México, 2023), la cual fue procesada para representarse por AGEBS urbanas con QGIS.

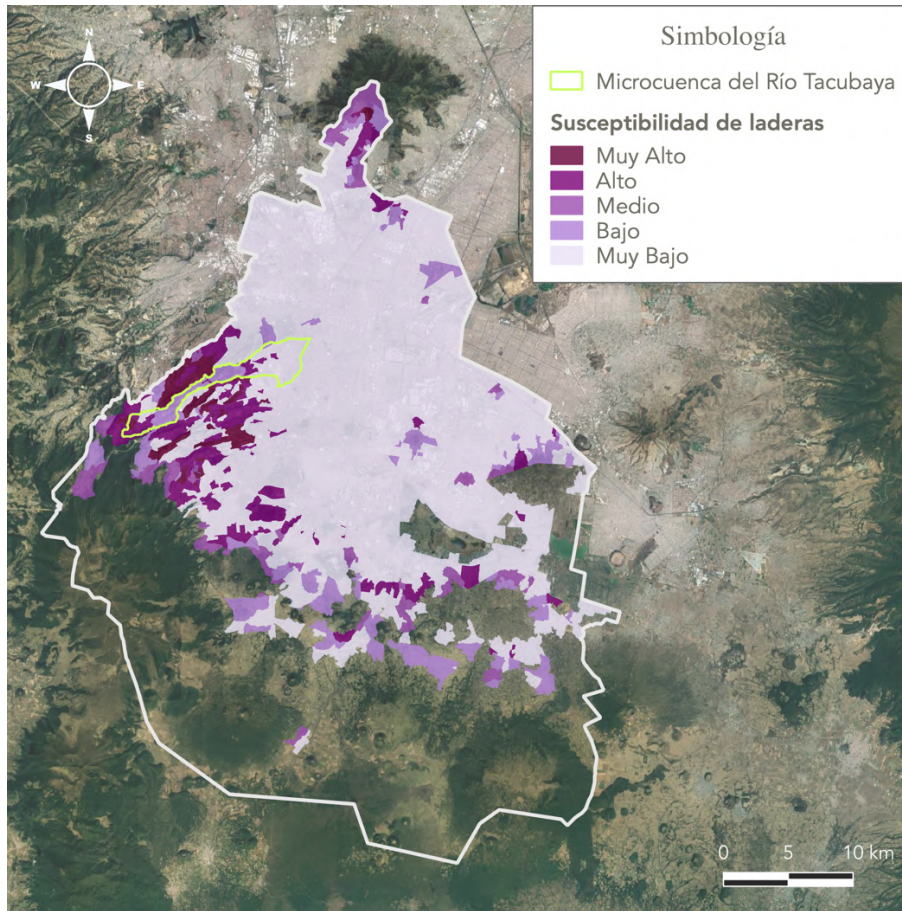


Ilustración 14. Mapa del indicador de susceptibilidad por laderas en las AGEBS urbanas de la Cd. de México. Elaboración propia con información del Portal de Datos Abiertos, 2023.

Ante los riesgos latentes en la MRT, es necesario tomar medidas que contribuyan a **evitar la ocurrencia de inundaciones en las zonas más bajas y reducir la presión al sistema de drenaje construido mediante la retención de los picos de escorrentías**. De igual forma, se deben introducir medidas para **disminuir el riesgo de deslizamientos**, por lo que es conveniente retrasar la escorrentía en las zonas altas, mejorar la estabilidad de laderas con vegetación y controlar la materia en suspensión que arrastran las corrientes durante las tormentas para evitar erosión y deslaves. Estas medidas son **puntos estratégicos que justifican la necesidad de incorporar infraestructuras verdes en la MRT que contribuyan a dichos propósitos**.

Por otro lado, en la zona media-alta de la Microcuenca del Río Tacubaya se localiza la Zona Especial de Desarrollo Controlado (ZEDEC) Santa Fe, un proyecto urbano

creado a principios de la década de 1990 que se ubica sobre los terrenos que antiguamente eran tiraderos de residuos urbanos a cielo abierto. Estos sitios de disposición de residuos funcionaron de 1950 y hasta 1987 cuando se inició su clausura, dando lugar a terrenos acondicionados mediante rellenos de arena (González Reynoso A. , 2014). Actualmente esta zona se distingue por ser un polo de desarrollo económico en la Ciudad de México donde se alojan grandes edificios corporativos, áreas de equipamiento urbano como hospitales, escuelas, centros comerciales y zonas residenciales. A pesar de su radical transformación, **esta zona representa un área vulnerable por el riesgo de la contaminación del subsuelo que es producto de los lixiviados procedentes de los residuos enterrados**, y que se concentran en lo que actualmente son los predios de Alameda Poniente y Prados de la Montaña (Sixtos, 2017; González Reynoso A. , 2014).

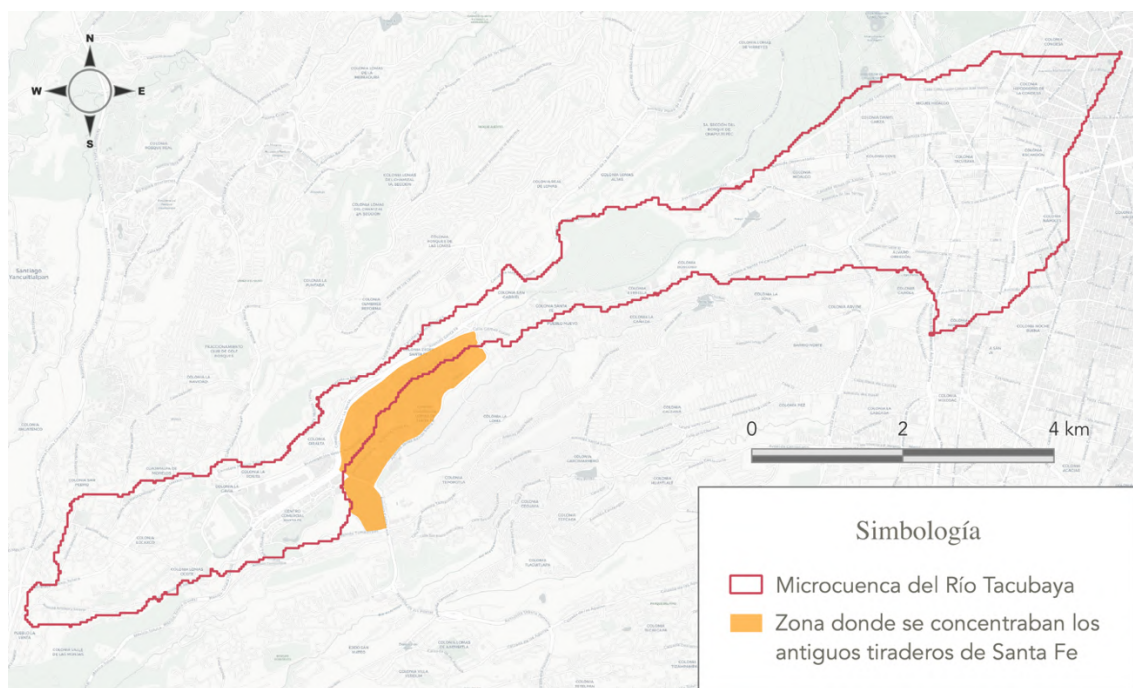


Ilustración 15. Localización de los antiguos tiraderos de residuos urbanos en Santa Fe. Elaboración propia con información de Sixtos, 2017.

Dichos contaminantes pueden ser arrastrados o filtrados a través de los suelos y dar lugar a la contaminación de cuerpos de agua subterráneos, provocando su deterioro y, en consecuencia, representan un riesgo potencial a la salud humana y

otros organismos vivos; tal como se menciona en la NOM-083-SEMARNAT-2003 en la cual se detallan las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial (Diario Oficial de la Federación, 2004). Por esta razón, es importante tener en cuenta que las intervenciones para mejorar la infiltración de agua y escorrentías en el área de los antiguos rellenos sanitarios deberá restringirse para evitar el riesgo de contaminación del agua subterránea. Así mismo, se pueden considerar otro tipo soluciones de **infraestructura verde que contribuya a reducir la contaminación de la escorrentía que es arrastrada en lugares con suelos contaminados hacia las partes bajas**, lo cual representa una oportunidad para incorporar infraestructuras de tratamiento de agua como medida para mitigar el impacto de la contaminación.

Prospectivas

En esta sección se describe una serie de prospectivas para mejorar el manejo del agua de lluvia y su escorrentía mediante la implementación de infraestructuras verdes en la Microcuenca del Río Tacubaya. Estas prospectivas surgen del análisis previo sobre las características, el contexto y los riesgos presentes en la MRT, lo cual permite ubicar las necesidades específicas y oportunidades para mejorar las condiciones actuales. Por lo tanto, es pertinente dividir el área de estudio para focalizar las estrategias de manejo de escorrentías de acuerdo con sus características y funciones hidrológicas, en tres zonas: cuenca alta, media y baja.

- **Cuenca alta:** Es la porción más elevada de la microcuenca donde se ubica el área de montaña y lomeríos. Es el área con mayor precipitación de toda la microcuenca, y a partir de aquí comienzan los escurrimientos que se dirigen hacia las partes más bajas, por esta razón se deben emplear medidas preventivas para evitar las inundaciones y el azolve cuenca abajo. Una buena

estrategia para esta zona es **retener** la mayor cantidad de agua, promover la formación de suelos que mejoren la capacidad de **absorción** y densificar la **cobertura vegetal** con especies locales para evitar el arrastre de sedimentos o contaminantes.

- **Cuenca media:** En esta zona los escurrimientos se concentran y pueden alcanzar grandes velocidades por la presencia de pendientes pronunciadas, provocando erosión y deslaves que representan un riesgo para la seguridad de las personas. Es importante tomar medidas que permitan **retrasar** el flujo de escorrentías y **retener** la mayor cantidad de agua para evitar inundaciones en la cuenca baja (AEP, 2016). Estas medidas también pueden estar orientadas a detener el agua y dar tiempo para aumentar la tasa de **infiltración**, lo que además contribuye a largo plazo a la recuperación de las fuentes de agua subterránea en la zona baja. Por otro lado, la **revegetación** de áreas con pendientes pronunciadas puede ser una buena alternativa para evitar la erosión, los deslizamientos y retener concentraciones de sedimentos y contaminantes.
- **Cuenca baja:** En condiciones previas a la intervención del drenaje, esta zona sería el sitio donde el Río Tacubaya desembocaba en el antiguo Lago de Texcoco. Se caracteriza por ser una zona poco permeable y altamente susceptible a inundaciones, pues aquí se acumulan los escurrimientos procedentes de las partes más altas, junto con la contaminación y los azolves que arrastran las escorrentías. Las estrategias de infraestructura verde para esta zona deberán orientarse a **captar y almacenar** la mayor cantidad de agua para prevenir la saturación del sistema de drenaje construido y aprovechar la retención para **reducir la cantidad de contaminantes** y mejorar su calidad, incluso reutilizar el agua tratada para que pueda aprovecharse en otros usos.

En el siguiente esquema se enlistan algunas **líneas de acción para la implementación de infraestructuras verdes que se proyectan a partir de las**

estrategias prospectivas para cada zona de la MRT. Las líneas de acción planteadas van orientadas a la posibilidad de modificar el destino de la lluvia que llega a la superficie terrestre mediante una adecuada gestión de la interfaz suelo-vegetación. En ellas se destaca la importancia de mantener y preservar la cobertura vegetal y la salud del suelo, pues esto influye de manera significativa en los procesos de recarga de agua subterránea, la atenuación de la escorrentía y la retención de humedad. Estos procesos son los que permiten el regreso del agua al subsuelo o a la atmósfera mediante los flujos de evapotranspiración, que pueden acelerarse y se promueven al intervenir los espacios verdes existentes en infraestructuras verdes para el manejo de escorrentías.



Ilustración 16. Esquema de prospectivas de manejo de escorrentía en la MRT. Elaboración propia.

Selección de tipologías de infraestructura verde

El paso siguiente fue identificar de entre una amplia gama de tipologías de infraestructura verde aquellas con mayor potencial para intervenir las áreas verdes públicas existentes en la Microcuenca del Río Tacubaya. La selección de tipologías se fundamentó en tres criterios principales:

- Selección de tipologías que se puedan adaptar a espacios pequeños como jardineras, parques, arriates, camellones, entre otras áreas verdes ligadas a la red vial. Dado que la mayoría de estos espacios se encuentran en estado de deterioro y fragmentación, por lo que requieren ser intervenidas para mejorar su estado actual.
- Infraestructuras verdes diseñadas especialmente para el control y manejo de escorrentías, que cumplan funciones de almacenamiento, infiltración, retención y tratamiento. Con la finalidad de que estas funciones puedan aportar a las estrategias prospectivas que se plantearon para las tres zonas de la MRT.
- Contar con información suficiente de la tipología seleccionada, basada en su eficiencia probada y documentada, de preferencia en ciudades mexicanas o contextos similares al de la MRT. Este aspecto es muy importante, pues de esta información se extraerán los datos que servirán poder calibrar el algoritmo de selección de tipologías factibles para cada área verde urbana en las etapas posteriores. De forma específica, se buscó información completa sobre los criterios de construcción y diseño que servirán como parámetros para determinar si un sitio es apto o no para su implementación.

Para la selección de tipologías se revisaron más de 22 fuentes de información, entre manuales de diseño y construcción de infraestructuras verdes, documentos normativos y artículos académicos, de los cuales se extrajo la información técnica sobre las variables y parámetros determinantes para su implementación. Durante este proceso también se visitaron y documentaron diferentes proyectos de

infraestructura verde que se encuentran operando en la Ciudad de México, Chiapas, Morelos y Guerrero. En estos recorridos, se realizó una visita para conocer dos proyectos en los Estados de Morelos y Guerrero, en los que se visitaron humedales de tratamiento a escala municipal y en edificios públicos, dichas visitas formaron parte del curso “Tratamiento de aguas residuales mediante sistemas naturales (humedales y lagunas artificiales)”, mismo que se imparte en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). También, se contó con el apoyo del IHE-Delft en los Países Bajos, donde se realizaron visitas a la ciudad de Rotterdam para conocer ejemplos de infraestructuras verdes en entornos urbanos, los recorridos fueron parte del curso de “Ciudades Sensibles al Agua” que se imparte en el IHE.



Ilustración 17. Collage de fotografías tomadas durante las visitas y recorridos a proyectos de infraestructura verde en México y Países Bajos. Elaboración propia.

Tras el proceso exploratorio, **se seleccionaron doce tipologías que son agrupadas de acuerdo su función principal para el manejo y control de escorrentías**, en cuatro grupos: infraestructuras de retención, de retraso, de infiltración y de tratamiento. Cabe señalar que la mayoría de estas tipologías de infraestructura verde no pueden encasillarse de forma estricta en una sola función, pues el manejo del agua con sistemas naturales tiene intrínsecos múltiples procesos, sin embargo, **se asignó aquella función con mayor peso**. En el

siguiente esquema se muestra el espectro de clasificación asignado para las doce tipologías seleccionadas y su correspondencia con cada zona de la cuenca.

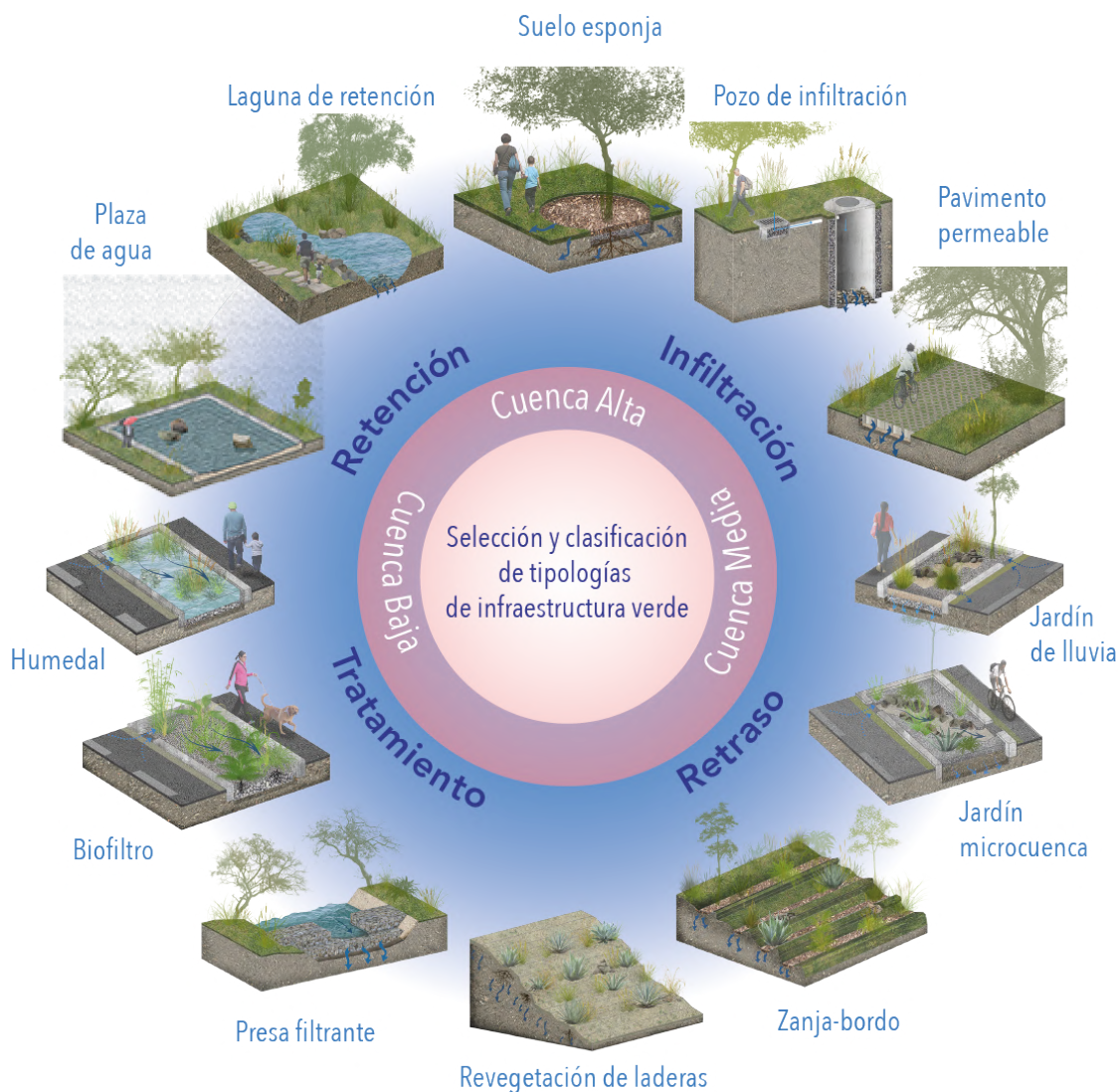


Ilustración 18. Selección de tipologías de infraestructura verde a partir de las líneas prospectivas de manejo de escorrentías en la MRT. Elaboración propia.

Para la evaluación de factibilidad de estas tipologías seleccionadas en un sitio específico, es determinante conocer los requerimientos físicos del área donde se proyecta su implementación, pues este aspecto podría dificultar o imposibilitar su operación o construcción (CSIRO, 2006). Las variables de factibilidad que se identificaron como determinantes para estimar la idoneidad en un sitio a intervenir fueron:

- Tamaño mínimo de superficie (m²)
- Pendiente del terreno (grados o %)
- Capacidad de infiltración del suelo (cm/hora)
- Distancia al nivel freático (metros)

El paso siguiente fue sintetizar las características y requerimientos técnicos de cada tipología, para lo cual se elaboró un compendio de fichas técnicas, en las que se describen y ordenan los factores determinantes para evaluar la factibilidad de implementación en un área o sitio específico. Las fichas y descripciones de cada tipología se muestran a continuación, y se ordenan por tema de acuerdo a su función principal.

Infraestructuras verdes de retención

- PLAZA DE AGUA

Las plazas de agua son espacios al aire libre que durante las tormentas sirven como reservorios o almacenamientos temporales para captar los excedentes de agua de escorrentías y evitar inundaciones en las áreas circundantes (AEP, 2016). Estos espacios son infraestructuras con un doble propósito, pues por un lado contribuyen a canalizar los picos de tormentas y servir de alivio para el sistema de drenaje construido, mientras que cuando se drenan se transforman en espacios recreativos que mejoran la calidad del espacio público, por ejemplo, en canchas, anfiteatros, fuentes, patios de juego, etc. El agua que se almacena en las plazas de agua puede ser drenada lentamente a través de una base de pavimento permeable, también puede ser canalizada al sistema de drenaje construido una vez que la red se vacía, o aprovecharse como reservorio para el riego, u otros usos.

PLAZA DE AGUA



Las plazas de agua son almacenamientos temporales de agua pluvial diseñados para cumplir un doble propósito, por un lado captan los picos de tormentas para evitar inundaciones y dar alivio a la saturación del drenaje construido, mientras que cuando se vacían sirven como espacios recreativos, por ejemplo: canchas, anfiteatros, fuentes, área de juegos, etc.

SUPERFICIE
 Requieren espacios amplios por su doble propósito como áreas recreativas. Normalmente se construyen dentro de parques o plazas públicas, por lo que se considera un mínimo de 100 m².

PENDIENTE
 Las plazas de agua son depresiones construídas sobre terrenos planos, con pendientes suaves menores al 8%.

INFILTRACIÓN
 Dado que son infraestructuras de captación y almacenamiento, la tasa de infiltración del suelo no es un aspecto relevante, pues se construyen con materiales impermeables o concretos semi-impermeables.

NIVEL FREÁTICO
 Es recomendable evitar las zonas próximas a acuíferos para limitar las filtraciones y evitar la contaminación. Normalmente, las plazas de agua tienen una profundidad entre 1-2 metros, pero este factor puede variar dependiendo del su diseño, así como de las posibilidades de construcción en del sitio donde se proyecta.

FUENTES

- AEP. (2016). Hacia una Ciudad de México sensible al agua. El espacio público como una estrategia de gestión de agua de lluvia. Ciudad de México. Autoridad del Espacio Público: Gobierno de la Ciudad de México.
- Urbanisten. (s.f.). Watersquare Benthemplein, Rotterdam. <https://www.urbanisten.nl/work/benthemplein>
- Water Sensitive Cities. (2019). Short Courses. IHE Delft Institute for Water Education.

Ilustración 19. Ficha técnica de plaza de agua. Elaboración propia.

- **LAGUNA DE RETENCIÓN**

Las lagunas de retención, también conocidas como depósitos superficiales de detención o depósitos secos, son depresiones suaves en el terreno natural que sirven para almacenar temporalmente la escorrentía, con la finalidad de atenuar los picos de tormenta y desviar el agua hacia este sitio de inundación controlada (Abellán, 2015). Las lagunas de retención aportan un valor paisajístico por su atractivo visual cuando están llenas, mientras que cuando se vacían pueden aprovecharse como áreas verdes de uso recreativo o deportivo. Su drenaje ocurre a través de la percolación lenta en el suelo hacia capas más profundas, por lo que favorecen la sedimentación de contaminantes y la recarga de fuentes subterráneas.



Ilustración 20. Ficha técnica de laguna de retención. Elaboración propia.

- **SUELO ESPONJA**

Es una medida para retener y preservar la humedad en los suelos de las áreas verdes, incorporando materiales que permiten absorber una gran cantidad de agua. Normalmente se añaden capas de grava, arena, rocas o tezontle, y material orgánico en la superficie, como astillas de madera (acolchado), aserrín, paja, cortezas u hojarasca. Esta medida tiene múltiples ventajas, por un lado, es una técnica eficiente para incrementar la retención y absorción de escurrimientos, también contribuye a la formación de suelos sanos que mejoran la salud de la vegetación, provee las condiciones necesarias para la formación de biota del suelo y disminuye el trabajo de mantenimiento en las áreas verdes.

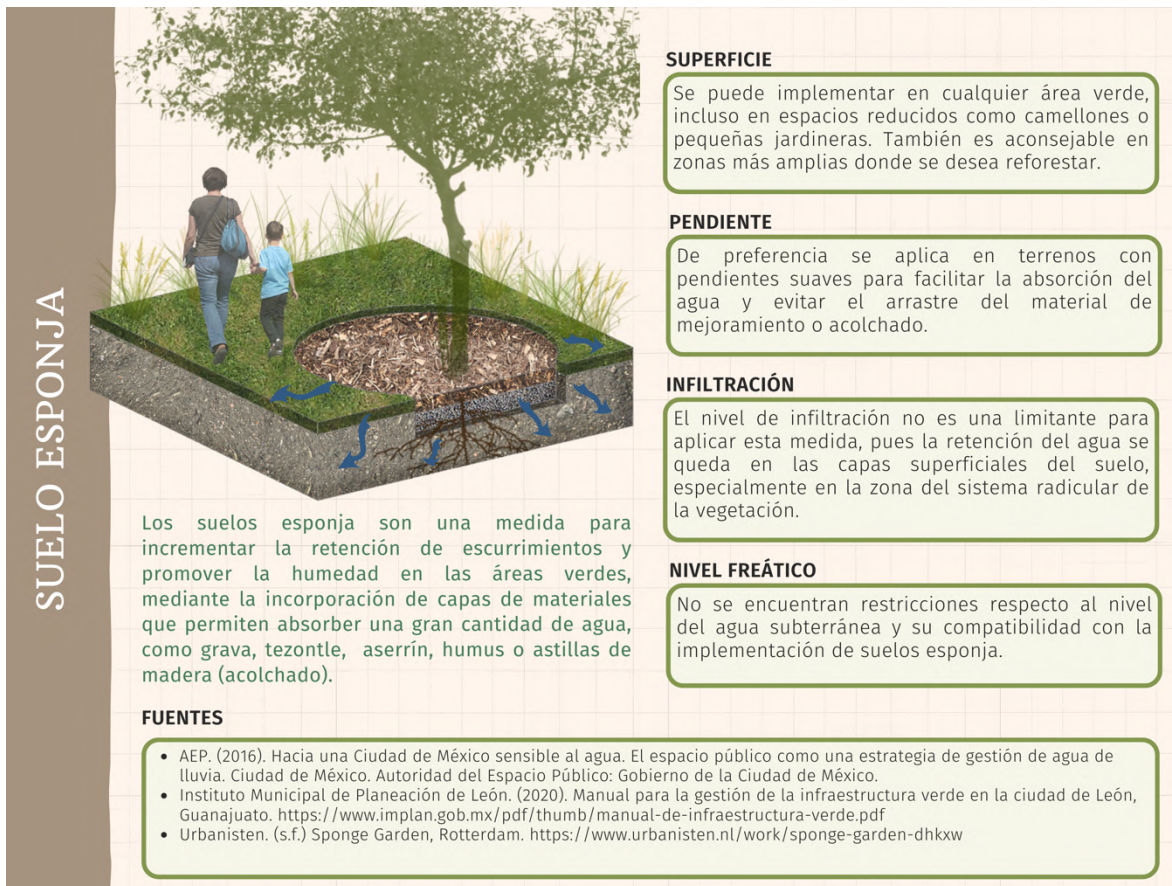


Ilustración 21. Ficha técnica de suelo esponja. Elaboración propia.

Infraestructuras verdes de infiltración

- JARDÍN MICROCUENCA

El jardín microcuenca está conformado por una o más cavidades de entre 20 y 50 centímetros de profundidad que se llenan de agua durante las tormentas. Esta medida contribuye a retener, retrasar e infiltrar los escurrimientos pluviales, mientras que mejora las cualidades paisajísticas de las zonas donde se implementan. También puede disponerse de cavidades en forma longitudinal para formar arroyos o canales de retención. Es una medida sencilla y de bajo costo, que puede integrarse en áreas verdes pequeñas asociadas a la red vial como camellones, arriates o jardineras, para lo cual se hace un corte en la guarnición de la banqueta

que permite fluir el agua hacia adentro de la microcuenca, y otra abertura para canalizar los excedentes de agua una vez que se llena (IMPLAN Hermosillo, 2019).

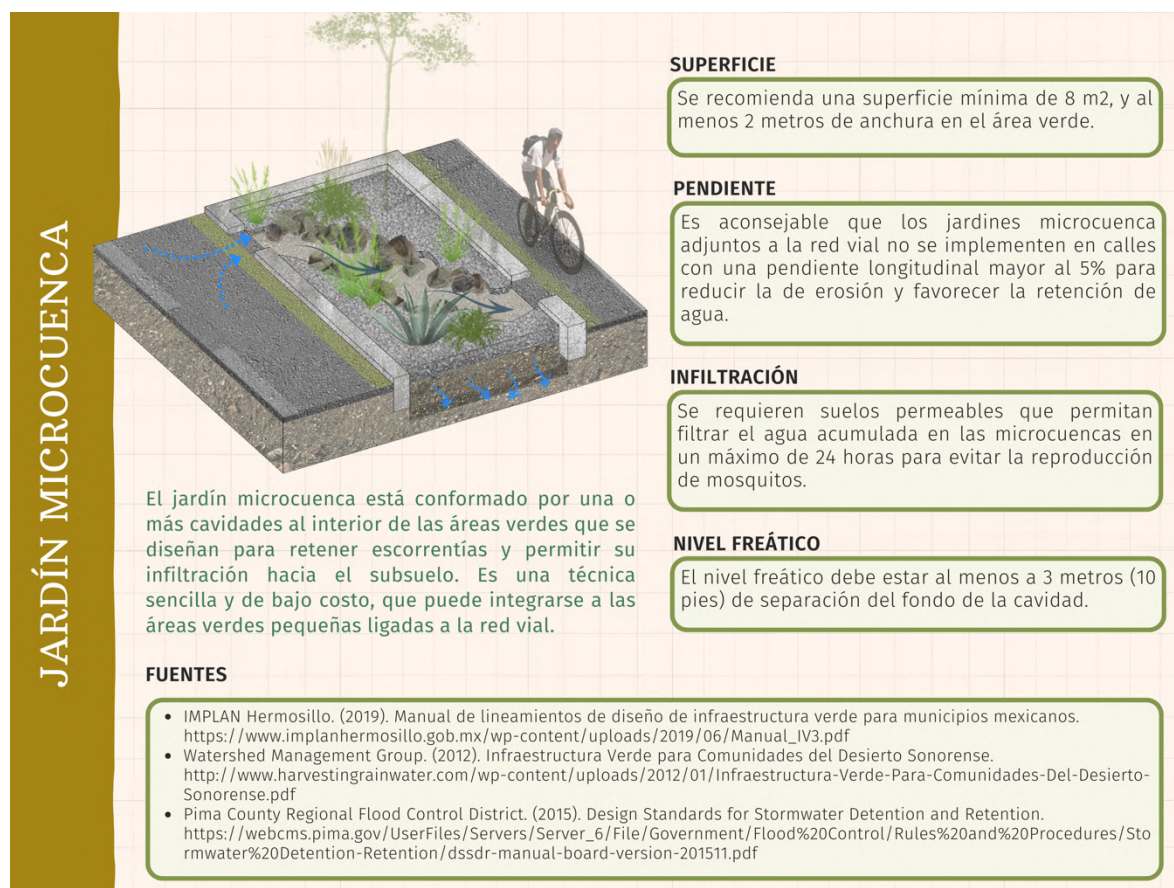



Ilustración 22. Ficha técnica de jardín microcuenca. Elaboración propia.

- **JARDÍN DE LLUVIA**

Los jardines de lluvia o cuencas de bio-retención, son sistemas de captación de escorrentías en los que se añaden capas de sustratos porosos como grava, tezontle o arena para acelerar la infiltración del agua. Son similares en apariencia a los jardines microcuenca, con la diferencia de que pueden retener y drenar una mayor cantidad de agua por la incorporación de materiales con diferentes granulometrías que van permitiendo el paso del agua, y al mismo tiempo remueven algunos contaminantes. Estas capas porosas se incorporan haciendo una excavación de entre 0.7 a 1.2 metros de profundidad que es relleno con el material permeable,

y en el nivel superior se modelan las depresiones o microcuencas que servirán para canalizar la escorrentía.

JARDÍN DE LLUVIA



Los jardines de lluvia son sistemas que incorporan capas de materiales permeables en los niveles inferiores del suelo, con la finalidad de acelerar el proceso de infiltración del agua y remover algunos contaminantes presentes. En la parte superior se modelan suaves cavidades o microcuencas, que sirven como depósitos para retener la escorrentía.

SUPERFICIE
El tamaño mínimo de superficie recomendada para la construcción de un jardín de lluvia es de 18 m².

PENDIENTE
El terreno debe tener pendientes suaves que no superen el 15% para evitar deslizamientos.

INFILTRACIÓN
Los suelos con altas tasas de infiltración son deseables, y se recomienda que el sistema se vacíe por completo en un máximo de 24 horas.

NIVEL FREÁTICO
No se debe construir un jardín de lluvia en un suelo que tenga un nivel freático alto, por lo menos debe existir 3 metros de separación desde el fondo de la estructura.

FUENTES

- Abellán, Ana. (2015). "Medidas estructurales". SuD Sostenible. <http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/>
- IMPLAN Hermosillo. (2019). Manual de lineamientos de diseño de infraestructura verde para municipios mexicanos. Instituto Municipal de Planeación Urbana de Hermosillo. https://www.implanhermosillo.gob.mx/wp-content/uploads/2019/06/Manual_IV3.pdf
- NVSWCD. (2009). Rain Garden Design and Construction: A Northern Virginia. Homeowner's Guide. Virginia: Fairfax County. <https://www.fairfaxcounty.gov/soil-water-conservation/sites/soil-water-conservation/files/assets/documents/raingardenbk.pdf>

Ilustración 23. Ficha técnica de jardín de lluvia. Elaboración propia.

- **PAVIMENTO PERMEABLE**

Son pavimentos continuos o modulares que permiten el paso del agua hacia las capas inferiores del suelo. A diferencia de los pavimentos convencionales están fabricados con materiales porosos que permiten el tránsito rápido del agua, o bien tienen una separación entre sus piezas que se rellena con arena para permitir la infiltración entre sus juntas. Para su instalación se coloca una cama de grava o arena debajo del pavimento permeable con la finalidad de mejorar su funcionamiento y su capacidad de drenado. Deben evitarse en zonas que reciben mucha escorrentía o en suelos contaminados, pues tienden a obstruirse sus poros.

PAVIMENTO PERMEABLE



Son pavimentos continuos o modulares que permiten la infiltración del agua hacia las capas inferiores del suelo ya que están fabricados con materiales porosos, o bien sus piezas tienen separaciones que permiten el paso del agua entre juntas. Normalmente son utilizados en áreas de tránsito ligero como senderos o áreas deportivas.

FUENTES

- Abellán, Ana. (2015). "Medidas estructurales". SuD Sostenible. <http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/>
- IMPLAN Hermosillo. (2019). Manual de lineamientos de diseño de infraestructura verde para municipios mexicanos. Instituto Municipal de Planeación Urbana de Hermosillo. https://www.implanhermosillo.gob.mx/wp-content/uploads/2019/06/Manual_IV3.pdf
- San Mateo County. (2009). San Mateo County Sustainable Green Streets and Parking Lots Design Guidebook. <https://www.flowstobay.org/documents/municipalities/sustainable%20streets/San%20Mateo%20Guidebook.pdf>

SUPERFICIE

Se pueden adaptar a cualquier espacio disponible. En senderos o andadores se recomienda un mínimo de 1 metro de ancho.

PENDIENTE

El terreno debe ser plano o con pendientes muy suaves que no superen el 5% de inclinación.

INFILTRACIÓN

El suelo debe tener una alta capacidad de infiltración, se aconseja su instalación en zonas con tasas mayores a 1.5 cm/hora.

NIVEL FREÁTICO

La distancia mínima entre el pavimento y el nivel freático deberá ser superior a 1.2 metros.

Ilustración 24. Ficha técnica de pavimento permeable. Elaboración propia.

- **POZO DE INFILTRACIÓN**

Son estructuras que tienen la función de aumentar y acelerar la infiltración de agua pluvial al subsuelo mediante excavaciones revestidas que permiten el paso de agua a través de sus paredes y su base. Normalmente tienen un diámetro de 1 metro y una profundidad de entre 1 y 6 metros. Su construcción puede hacerse con muros de ladrillo, bloques de piedra o concreto. Pueden ser huecos o estar rellenos de material filtrante como grava, arena o piedras.

POZO DE INFILTRACIÓN

Son estructuras que tienen la función de aumentar y acelerar la infiltración de agua pluvial al subsuelo mediante excavaciones revestidas que permiten el paso del agua a través de sus paredes y su base.

FUENTES

- Abellán, Ana. (2015). "Medidas estructurales". SuD Sostenible. <http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/>
- IMPLAN Hermosillo. (2019). Manual de lineamientos de diseño de infraestructura verde para municipios mexicanos. Instituto Municipal de Planeación Urbana de Hermosillo. https://www.implanhermosillo.gob.mx/wp-content/uploads/2019/06/Manual_IV3.pdf
- Pima County. (2015). Low Impact Development and Green Infrastructure Guidance Manual. Tucson, EE.UU. https://webcms.pima.gov/UserFiles/Servers/Server_6/File/Government/Flood%20Control/Floodplain%20Management/Low%20Impact%20Development/li-gi-manual-20150311.pdf

SUPERFICIE
Los pozos de infiltración ocupan muy poca superficie para su construcción, se considera como mínimo un área de 1.5 a 2 m².

PENDIENTE
La pendiente del terreno no debe superar el 8% de inclinación, en caso contrario se deben hacer estudios geotécnicos para verificar la estabilidad de taludes.

INFILTRACIÓN
Requiere suelos permeables con tasas superiores a los 1.2 cm/hora, de preferencia suelos rocosos o arenosos, que no contengan arcillas.

NIVEL FREÁTICO
Es muy importante que entre la base del pozo y el nivel freático exista una distancia de al menos 5 metros para proteger los acuíferos de la contaminación y cuidar la calidad del agua que ingresa al sistema. Además deben estar alejados al menos a 30 metros de distancia lineal de cualquier pozo de extracción (NOM-015-CONAGUA-2007).

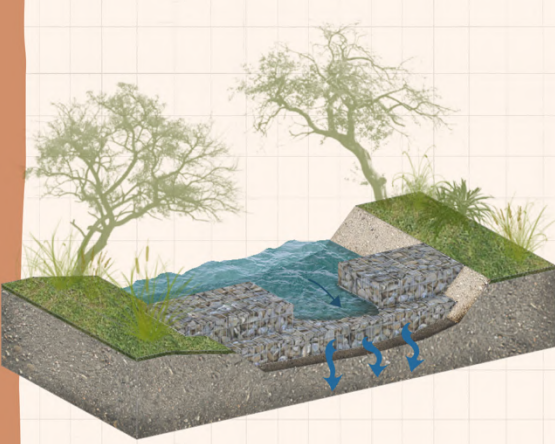
Ilustración 25. Ficha técnica de pozo de infiltración. Elaboración propia.

Infraestructuras verdes de retraso

- PRESA FILTRANTE

Son barreras permeables colocadas en sentido transversal a la pendiente con la finalidad de reducir la velocidad de escorrentías y retener el agua. Además, proporcionan otras ventajas importantes como la disminución de la erosión y prevención de inundaciones en las áreas ubicadas cuenca abajo. Al retrasar el flujo de las escorrentías también se obtienen otros beneficios como la disminución de azolves y la retención de sedimentos. Son aconsejables para zonas con pendientes pronunciadas o para el control de la erosión en cárcavas. Pueden ser construidas con piedras o gaviones.

PRESA FILTRANTE



Son barreras permeables colocadas en sentido transversal a la pendiente con la finalidad de reducir la velocidad de escorrentías y retener el flujo del agua. Además, proporcionan otras ventajas importantes como la disminución de la erosión y la prevención de inundaciones en las áreas bajas.

SUPERFICIE
Es una técnica que se implementa en zonas con depresiones marcadas como cárcavas u hondonadas, o bien en laderas con pendientes abruptas, por esta razón su construcción es adecuada para áreas verdes amplias, como parques o terrenos baldíos.

PENDIENTE
Se emplean en terrenos con pendientes pronunciadas mayores a 25%.

INFILTRACIÓN
Es preferible su implementación en suelos permeables, ya que favorecen la retención de agua, la infiltración y la recarga de acuíferos.

NIVEL FREÁTICO
No hay restricciones respecto al nivel freático que limiten la implementación de represas para el control de escorrentías.

FUENTES

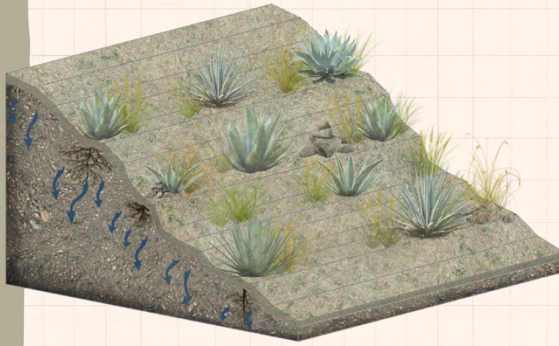
- AEP. (2016). Hacia una Ciudad de México sensible al agua. El espacio público como una estrategia de gestión de agua de lluvia. Ciudad de México. Autoridad del Espacio Público: Gobierno de la Ciudad de México.
- IMPLAN Hermosillo. (2019). Manual de lineamientos de diseño de infraestructura verde para municipios mexicanos. Instituto Municipal de Planeación Urbana de Hermosillo. https://www.implanhermosillo.gob.mx/wp-content/uploads/2019/06/Manual_IV3.pdf
- CONAFOR. (s.f.). Manual de conservación de suelos. Obras para el control de erosión en cárcavas. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/20/1311Manual%20de%20Conservacion%20de%20Suelos%20.pdf>

Ilustración 26. Ficha técnica de presa filtrante. Elaboración propia.

- **REVEGETACIÓN DE LADERAS**

Es una medida de estabilización de laderas que consiste en proveer de cobertura vegetal en las áreas con pendientes pronunciadas, de tal forma que las raíces refuerzan el suelo para incrementar su estabilidad y evitar la erosión. Esta técnica es altamente efectiva para retrasar los flujos de escorrentías y sedimentos que de otra forma podrían incrementar el riesgo de deslizamientos. Se recomienda que la plantación se realice en hileras que siguen las curvas de nivel, y de preferencia con especies nativas adaptadas a las condiciones climáticas y ambientales para que se establezcan y propaguen de forma natural.

REVEGETACIÓN DE LADERAS



Es una técnica que consiste en proveer de cobertura vegetal en las áreas con pendientes pronunciadas, de tal forma que sus raíces refuerzan el suelo para incrementar su estabilidad y evitar la erosión. Esta medida es altamente efectiva para retrasar los flujos de escorrentías y sedimentos que de otra forma podrían incrementar el riesgo de deslizamientos. Además, la presencia de vegetación aumenta la tasa de infiltración de agua a través de su sistema radicular.

FUENTES

- AEP. (2016). Hacia una Ciudad de México sensible al agua. El espacio público como una estrategia de gestión de agua de lluvia. Ciudad de México. Autoridad del Espacio Público: Gobierno de la Ciudad de México.
- Instituto Municipal de Planeación de León. (2020). Manual para la gestión de la infraestructura verde en la ciudad de León, Guanajuato. <https://www.implan.gob.mx/pdf/thumb/manual-de-infraestructura-verde.pdf>
- CONAFOR. (2018). Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/20/1310Manual%20de%20Conservacion%20de%20Suelos%20.pdf>

SUPERFICIE

La revegetación de laderas puede aplicarse a todas las escalas, desde pequeños taludes hasta grandes extensiones como barrancas, cerros o bosques.

PENDIENTE

Normalmente se emplean en terrenos con pendientes fuertes y escarpadas donde otras medidas de retención no son viables.

INFILTRACIÓN

Es preferible su implementación en superficies permeables para favorecer la absorción de escorrentías.

NIVEL FREÁTICO

Esta medida puede aplicarse independientemente del nivel freático del agua subterránea.

Ilustración 27. Ficha técnica de revegetación de laderas. Elaboración propia.

- ZANJA -BORDO

Es una medida empleada para el control de la erosión laminar que consisten en un conjunto de zanjas que retienen agua, seguidas de montículos que sirven como bordos, mismos que pueden formarse con el material que se extrae en la excavación de las zanjas. Las zanjas y bordos se construyen en terrenos con pendientes suaves a moderadas, siguiendo las líneas de las curvas de nivel sobre las que se realiza la excavación de zanjas de 40 centímetros de ancho por 40 centímetros de profundidad para interceptar los escurrimientos.

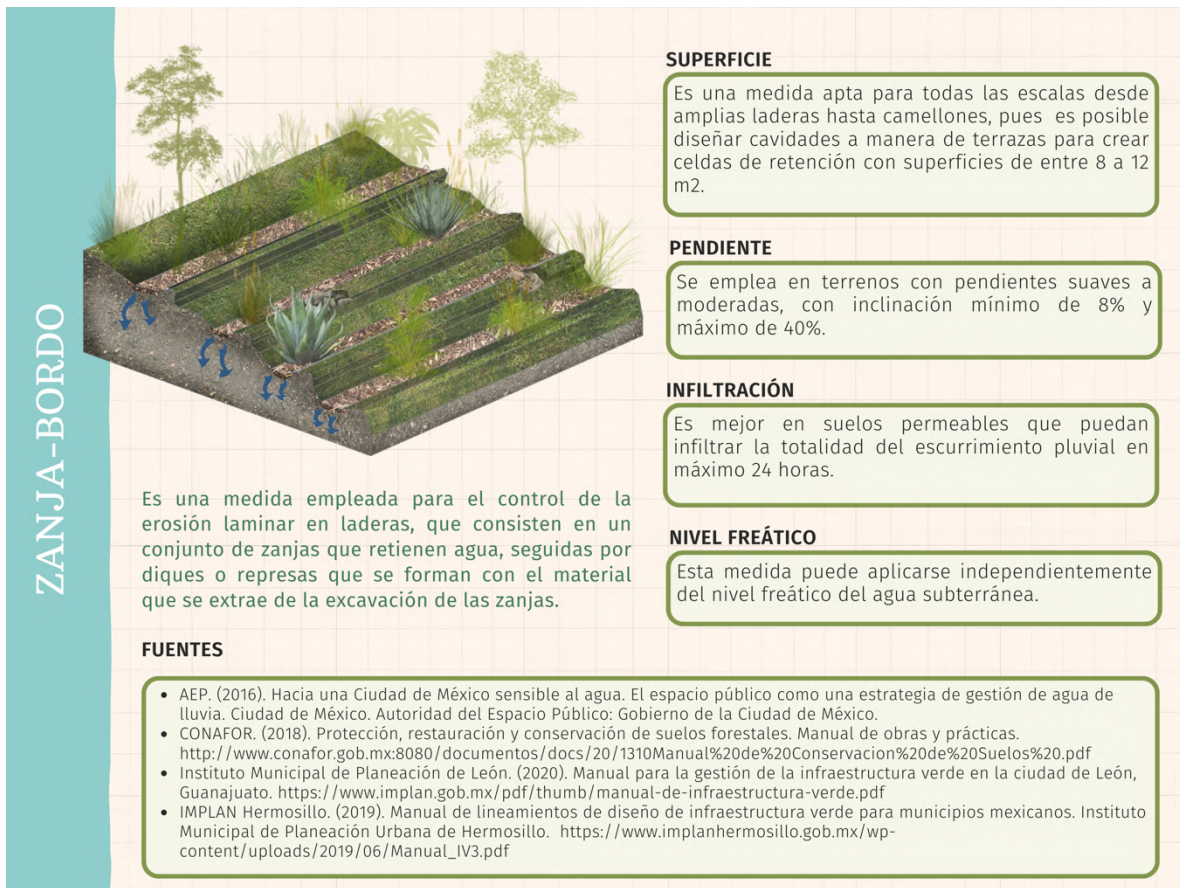



Ilustración 28. Ficha técnica de zanja-bordo. Elaboración propia.

Infraestructuras verdes de tratamiento

- **BIOFILTRO**

Los biofiltros son sistemas de remoción de contaminantes, también conocidos como humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial, bio-jardineras o franjas filtrantes. Se construyen a partir de cavidades rellenas de grava y arena, parcialmente inundados que remueven los contaminantes a partir de la vegetación y los procesos simbióticos de los microorganismos que degradan los contaminantes presentes. Estos sistemas proporcionan un tratamiento a nivel secundario, por lo que se recomienda interconectar más de un sistema o combinarse con otras tipologías para formar un tren de tratamiento (Rivas, 2019). Una vez que el agua de entrada pasa por el biofiltro esta puede ser aprovechada para riego u otros usos,

también puede ser canalizada hacia un pozo de infiltración. En caso de que se envíe hacia un cuerpo de agua será necesario evaluar su calidad para que cumpla con la normatividad aplicable (NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997).



BIOFILTRO

Los biofiltros son sistemas naturales de remoción de contaminantes de flujo horizontal subsuperficial, que contienen arena, grava y vegetación. Funcionan en simbiosis con microorganismos para degradar contaminantes mediante procesos mecánicos y bioquímicos.

SUPERFICIE
A partir de 10 m² para un sistema pequeño y una carga baja de contaminantes presentes en el agua de entrada.

PENDIENTE
Se recomienda una pendiente del terreno de 0.5%, puede ser mayor pero no deberá superar el 5% de inclinación.

INFILTRACIÓN
Es preferible su construcción sobre suelos impermeables y arcillosos, en caso contrario, se requiere la colocación de una capa impermeabilizante para su implementación.

NIVEL FREÁTICO
La base del sistema debe estar por encima del nivel freático, por lo que debe considerarse más allá de la profundidad del sistema, que varía entre 0.8 - 1 metro aproximadamente.

FUENTES

- Centro de Estudios y Promoción para el Habitar. (2010). Filtros biológicos para la remoción de nutrientes de aguas grises. PNUD Nicaragua. <https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/Biofiltros-Domiciliares.pdf>
- EPA. (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Humedales de flujo subsuperficial. EPA 832-F-00-023. United States Environmental Protection Agency, Office of Water Washington, D.C.
- GIZ. (2011). Revisión Técnica de Humedales Artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas. Agencia de Cooperación Internacional de Alemania. Programa de Saneamiento Sostenible ECOSAN. <https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/Revision-Tecnica-de-Humedales-Artificiales.pdf>
- Yocum, D. (2006). Manual de Diseño: Humedal construido para el tratamiento de las aguas grises por biofiltración. Universidad De California, 1-16. <https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/Manual-de-Diseño-para-Biofiltro.pdf>

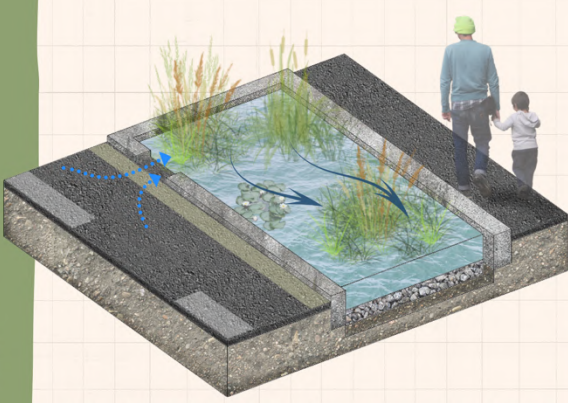
Ilustración 29. Ficha técnica de biofiltro. Elaboración propia.

• HUMEDALES DE TRATAMIENTO

Los humedales de tratamiento o humedales construidos son áreas permanentemente húmedas, poco profundas, con flujo lento y plantas acuáticas, en las que se busca reproducir los procesos de depuración y degradación que naturalmente ocurren en un humedal, pantano o ciénaga (Tilley, et al., 2018). La remoción de contaminantes se realiza mediante la simbiosis plantas-microorganismos conjuntamente con procesos físicos y bioquímicos. También son

encontrados en la literatura como humedal artificial de flujo superficial (HFS) o estanques de retención. Estos sistemas se emplean para el tratamiento final, es decir, para el pulimento de efluentes de otros sistemas de tratamiento, por ejemplo, aquellos que ya pasaron por un biofiltro (Rivas, 2019). El proceso de tratamiento es lento, ya que el agua debe permanecer en el humedal de 10 a 15 días para asegurar la remoción efectiva de contaminantes (ibidem), posteriormente puede ser aprovechada para riego u otros usos; también puede ser canalizada hacia un pozo de infiltración.

HUMEDAL



Los humedales son áreas permanentemente húmedas en las que la remoción de contaminantes se realiza mediante la simbiosis plantas-microorganismos conjuntamente con procesos físicos y bioquímicos. Estos sistemas se emplean para el tratamiento secundario, así como para el pulimento de efluentes de otros sistemas de tratamiento.

FUENTES

- Peña Guzmán, Carlos Andrés, & Lara Borrero, Jaime. (2012). TRATAMIENTO DE AGUAS DE ESCORRENTÍA MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES: ESTADO DEL ARTE. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 22(2), 39-61. Retrieved March 01, 2023, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-81702012000200003&lng=en&tlng=es.
- Rivas, Armando. (2011). Curso humedales para el tratamiento de aguas residuales. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA. SEMARNAT.
- Rivas, Armando. (2019). Tratamiento de aguas residuales mediante sistemas naturales (humedales y lagunas artificiales). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA.
- Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., Schertenleib, R., y Zurbrügg, C. (2018). Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento. Dübendorf (Suiza): Instituto Federal Suizo para la Ciencia y la Tecnología Acuática (Eawag), 2da. edición revisada.

SUPERFICIE

Estos sistemas demandan grandes superficies de terreno entre 35 y 100 m². Su dimensión está en función del caudal y la calidad de agua de entrada.

PENDIENTE

Se aconseja su implementación en terrenos llanos, con una pendiente entre el 2% al 8%.

INFILTRACIÓN

Están formados por un estanque con poca profundidad, impermeabilizado con una capa de geomembrana y de preferencia en terrenos con baja permeabilidad

NIVEL FREÁTICO

El nivel freático deberá estar por debajo de la profundidad del sistema que es de 0.6 metros para prevenir la contaminación de la capa freática.

Ilustración 30. Ficha técnica de humedal de tratamiento. Elaboración propia.

Selección de variables

Áreas verdes

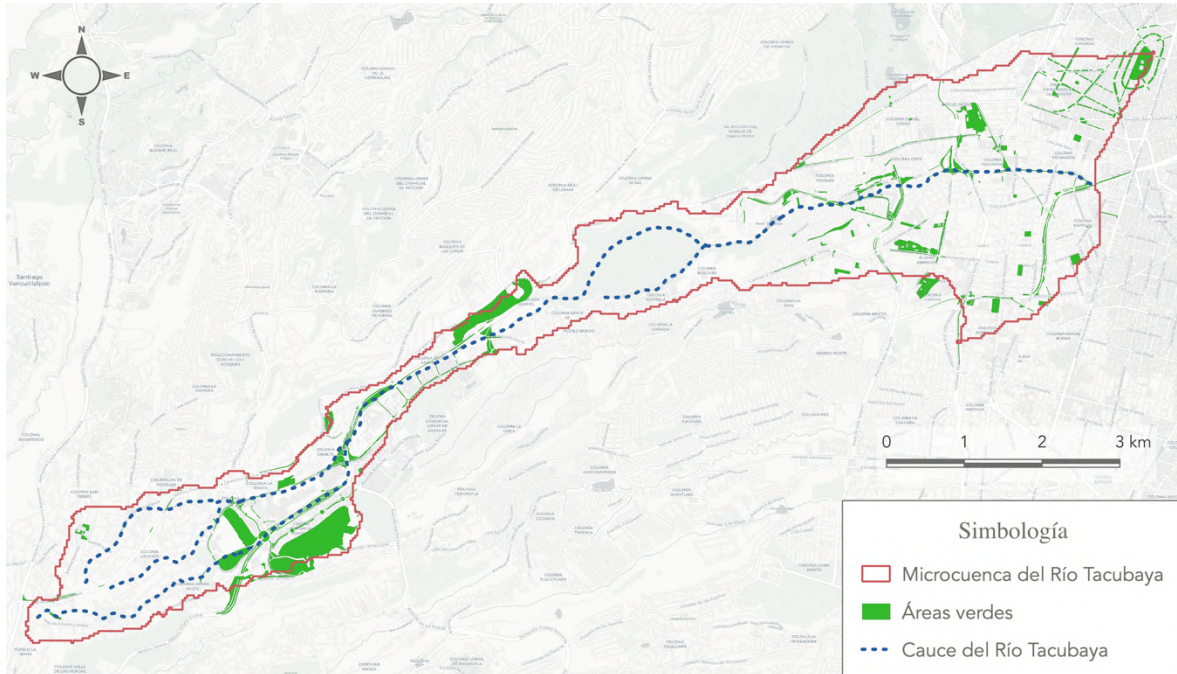


Ilustración 31. Mapa de las áreas verdes localizadas en la MRT. Elaboración propia.

Para obtener la información completa de los polígonos de áreas verdes públicas que se encuentran dentro de los límites del área de estudio, se procesaron y filtraron los datos vectoriales a partir de tres fuentes de información:

- Capa vectorial del Marco Geoestadístico 2020 del INEGI.
- Capa vectorial de Inventario de áreas verdes 2017 de la SEDEMA, descargado de la página de datos abiertos de la Ciudad de México.
- Consulta a la base de datos abierta de Open Street Maps (OSM), en la cual se filtraron los polígonos en categoría de parques y áreas verdes dentro del área de estudio.

Una vez seleccionados los polígonos de las áreas verdes que se encuentran dentro de la Microcuenca del Río Tacubaya, se realizó una revisión para descartar los polígonos duplicados y aquellos que se localizan en áreas de propiedad privada.

Posteriormente, se desagruparon los conjuntos de áreas verdes para poder aplicar el análisis a cada polígono en particular. En total se obtuvieron **543 polígonos** que suman en conjunto una superficie de **174.3 hectáreas** de áreas verdes públicas, mismas que se agrupan en ocho categorías:

- Camellón
- Glorieta
- Parques, arboledas y alamedas
- Plazas y jardines
- Áreas deportivas o recreativas
- Áreas con vegetación reminiscente
- Áreas verdes complementarias o ligadas a la red vial
- Áreas verdes urbanas fragmentadas

Para el cálculo de la superficie de cada polígono de área verde se aplicó el procesamiento de cálculo de área disponible en el software QGIS, mediante las funciones que ofrece la calculadora de campos. Es importante señalar que la selección excluye los polígonos bajo las categorías de Áreas Naturales Protegidas (ANP) y Áreas de Valor Ambiental (Bosques urbanos y barrancas). Específicamente, para el área de estudio **se descartaron los polígonos que conforman la 4ª sección del bosque de Chapultepec (Barranca Tacubaya) y la Barranca Mimosas, dado que se encuentran decretadas como zonas de protección especial, por lo que su intervención con infraestructuras verdes tal como se plantea en este proyecto está restringida** (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2011; Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2012).

Zonificación de la cuenca

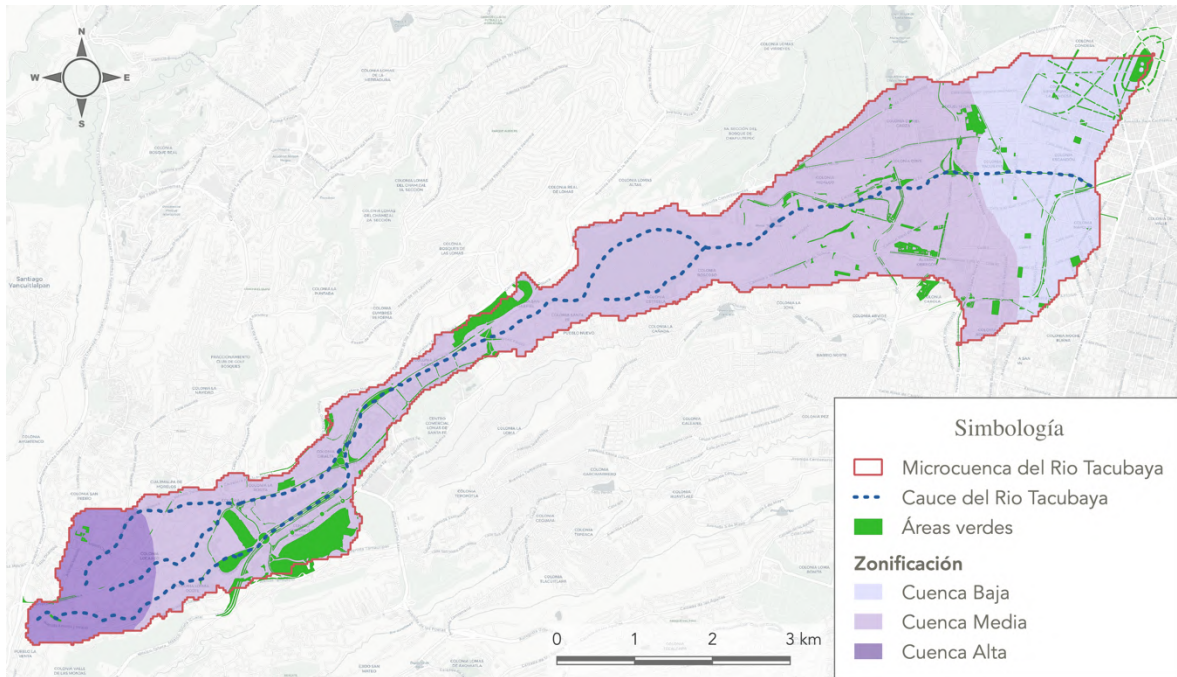
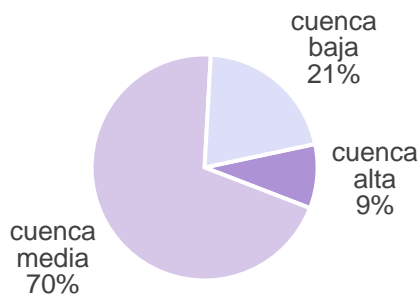


Ilustración 32. Mapa de zonificación en la MRT. Elaboración propia.

La definición de zonas funcionales de la cuenca se realizó a partir de la información disponible en la capa vectorial de zonas de cuenca para la Ciudad de México, del Instituto de Planeación Democrática y Prospectiva (Portal de Datos Abiertos, 2021), en la cual se delimita la distribución de la cuenca alta, la cuenca media y la cuenca baja en función de su dinámica hidrológica y geológica. Esta zonificación permitirá hacer una correspondencia con las estrategias prospectivas que se definieron previamente para cada zona, con la finalidad de calibrar el algoritmo de selección de infraestructuras verdes a partir de sus funciones principales (retención, retraso, infiltración o tratamiento), y con las estrategias designadas para el manejo de escorrentías en la parte alta, media y baja. En la gráfica se puede observar la distribución de la superficie para cada zona con respecto al área total de la MRT.



infiltración o tratamiento), y con las estrategias designadas para el manejo de escorrentías en la parte alta, media y baja. En la gráfica se puede observar la distribución de la superficie para cada zona con respecto al área total de la MRT.

Ilustración 33. Distribución de la superficie en cada una de las zonas de la MRT. Elaboración propia.

Pendiente

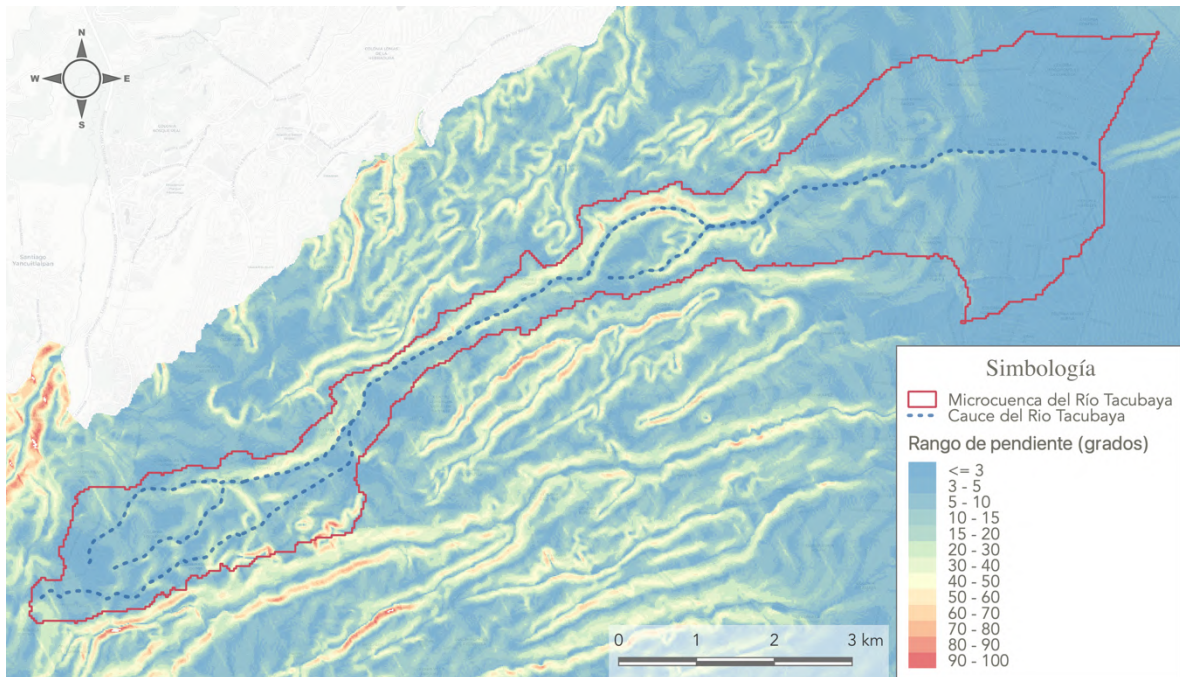


Ilustración 34. Mapa de los rangos de pendiente en la MRT. Elaboración propia.

La pendiente es una variable que define el comportamiento del agua sobre la superficie, entre mayor sea la inclinación del terreno aumenta la escorrentía superficial y su velocidad, dando lugar a la erosión y deslizamientos. Las pendientes moderadas ofrecerán mejores condiciones para que el agua se infiltre, mientras que las planicies generalmente desarrollan suelos impermeables (SIAPA, 2014). En la siguiente tabla se muestra una clasificación de rangos de pendientes en seis categorías que propone Córdova, M., 2010 (citado en INECC, 2014) para poder definir el nivel de inclinación de cada una de las áreas verdes.

Tabla 3. Clasificación de Pendientes. Elaboración propia basada en Córdova, M., 2010.

Rango en grados	Clasificación
0 – 3 °	Plano
3 – 5 °	Muy suave
5 – 15 °	Suave
15 – 35 °	Media
35 – 45°	Empinada
> 45 °	Abrupta

Para obtener el grado de la pendiente del terreno que abarca la Microcuenca del Río Tacubaya se aplicó el algoritmo *Slope* de QGIS al modelo digital de elevaciones de la Ciudad de México 2013 de INEGI con resolución de 15x15 metros/píxel. Esta función calcula el ángulo de inclinación del terreno a partir de una capa ráster de entrada y devuelve el cálculo de pendiente del terreno expresado en grados. Una vez obtenida la capa de pendientes se realizó el cálculo de la pendiente media para cada uno de los polígonos de área verde, utilizando la herramienta de análisis ráster y la función de estadísticas de zona en QGIS.

Infiltración

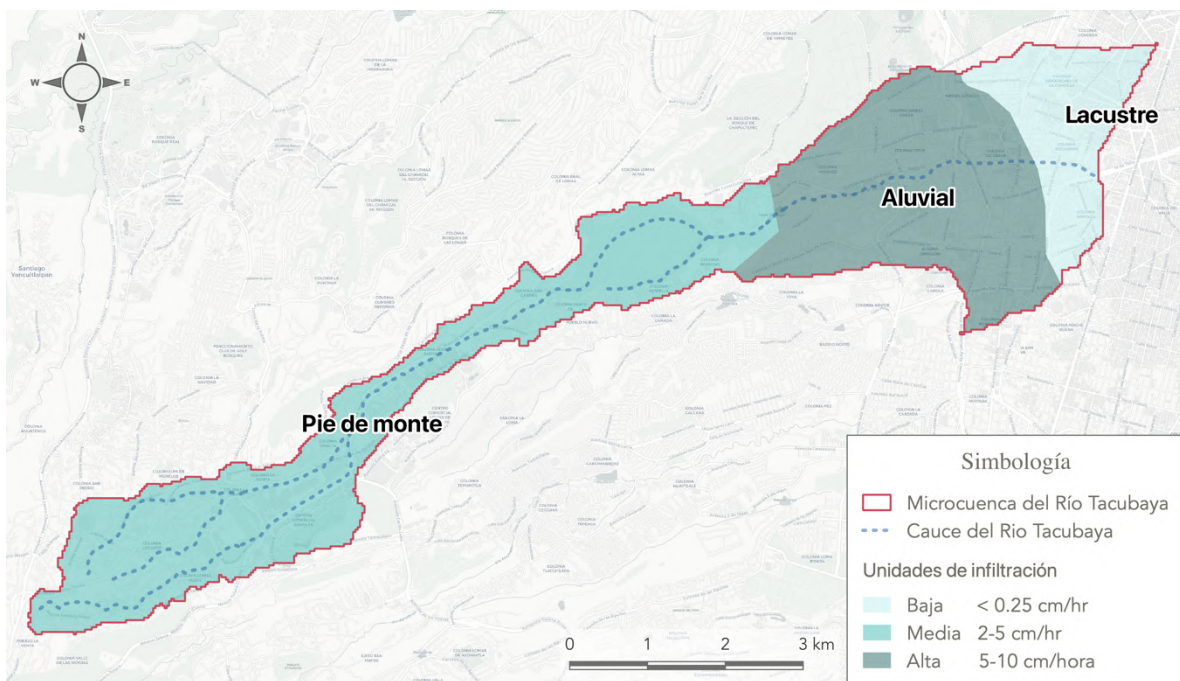


Ilustración 35. Mapa de las unidades de infiltración en la MRT. Elaboración propia.

Es importante reconocer el papel que tienen los suelos para definir la cantidad de agua que se infiltra o se evapora a través de la tierra, pues su composición, porosidad y estructura son definitivos en el uso de las infraestructuras verdes como estrategia para incrementar las tasas de agua que recargan las fuentes de abasto subterráneas (Gonzalez-Mora, Cervantes-Victoria, & Boyas-Martinez, 2020). Para

estimar la capacidad de infiltración de la microcuenca del Río Tacubaya se utilizaron los datos de la capa edafológica de INEGI y la capa geológica de la Ciudad de México en formato de capa vectorial (Instituto de Planeación Democrática y Prospectiva, 2022). Con base a estos datos se determinó el potencial de infiltración y se definió la permeabilidad de cada uno de los estratos. A partir de esta información se identificaron tres unidades de infiltración principales:

- En la **parte media y alta** de la Microcuenca del Río Tacubaya (pie de monte) se encuentran materiales de origen volcanoclástico de textura media con materia pétreo acumulada al pie de la Sierra de las Cruces, aquí se observan depósitos en pendiente como lahares, cenizas, grava y arena. La unidad de suelo que se presenta es Feozem, que se identifica como un suelo de capacidad de **infiltración moderada de 2 a 5 cm/hora** (Ministry of Water Resources, 2007), por lo que se consideran zonas aptas para captar y permitir la percolación del agua de lluvia a través de infraestructuras verdes de infiltración (Burns, y otros, 2009).
- En la **parte media-baja** de la cuenca se encuentran depósitos aluviales que conforman el área de transición que antiguamente marcaban la zona limítrofe del sistema lacustre compuesto principalmente por grava, arena y limo. Esta zona se caracteriza por tener un suelo permeable, principalmente Regosol y Andosol, con una tasa de infiltración **muy buena entre 5 y hasta los 10 cm/hora** (ibidem).
- La **parte baja** de la cuenca corresponde a la planicie lacustre compuesta por cenizas volcánicas y un estrato arcilloso (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2019). Se considera que esta zona tiene una baja permeabilidad por su alto contenido de arcillas, por lo que se le asigna una tasa de infiltración **muy lenta menor a 0.25 cm/hora** (Aparicio Mijares, Lafragua Contreras, Gutiérrez Lopez, Mejía Zermeño, & Aguilar Garduño, 2006).

Nivel freático

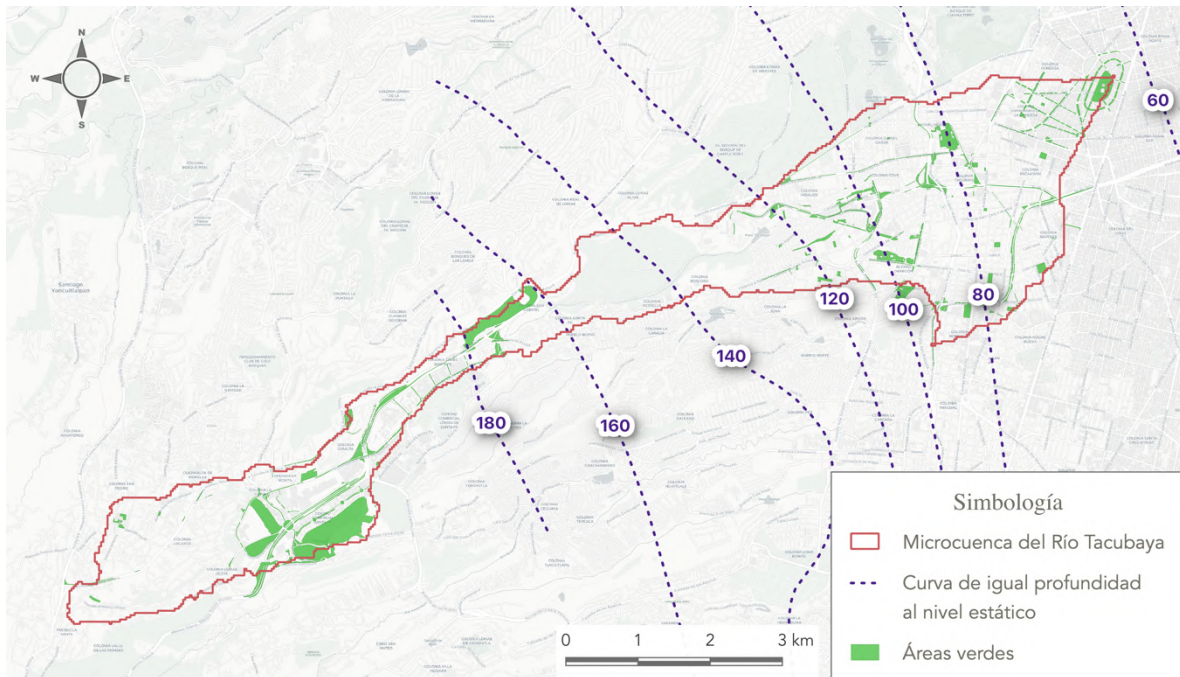


Ilustración 36. Mapa de curvas de igual profundidad al nivel estático del agua subterránea. Elaboración propia.

El comportamiento de los niveles del agua subterránea es un aspecto importante por considerar en la implementación de infraestructuras verdes que se destinan a aumentar la cantidad y la velocidad de infiltración de escorrentías. Especialmente cuando el nivel de profundidad de agua subterránea es somero, podría existir riesgo de contaminación y/o afloramiento de agua en el subsuelo, lo restringe la implementación de ciertas tipologías de infraestructura verde, especialmente aquellas que requieren excavación. En México las restricciones referentes a estos riesgos se especifican en la NOM-014-CONAGUA-2003 (Diario oficial de la Federación, 2009), y en la NOM-003-CNA-1996 (Diario Oficial de la Federación, 1997). Para la medición de esta variable se utilizaron los datos de la profundidad al nivel estático del acuífero para julio de 2012, que se obtuvieron del conjunto de Datos Aguas Subterráneas de la Zona Hidrogeológica Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Texcoco, Chalco Amecameca, escala 1:100 000, de INEGI. De esta información se consideran las curvas de igual profundidad al nivel estático que atraviesan el área de la microcuenca del Río Tacubaya.

Como se muestra en el mapa, se observa que los valores oscilan de 60 a 180 metros siendo la profundidad más reducida en la parte baja de la microcuenca, que aumenta gradualmente conforme se eleva el nivel del suelo hacia la parte montañosa, lo que también indica la dirección de flujo subterráneo hacia la zona del valle. El valor de la profundidad al nivel estático se proyectó por rangos hacia la capa de áreas verdes, asumiendo que el nivel cambia gradualmente de acuerdo con el valor de las curvas de igual profundidad. Dicho rango fue trasladando hacia los polígonos de las áreas verdes dependiendo de su localización, como se muestra en el siguiente mapa. Debe considerarse que el valor del nivel estático de profundidad es fluctuante, y puede cambiar de acuerdo con variables ambientales como la estacionalidad y la precipitación, o por otros factores como la concentración de pozos de extracción que podrían alterar el flujo natural del agua subterránea al provocar conos de abatimiento, por lo que es aconsejable hacer una revisión posterior si estas condiciones se modifican.

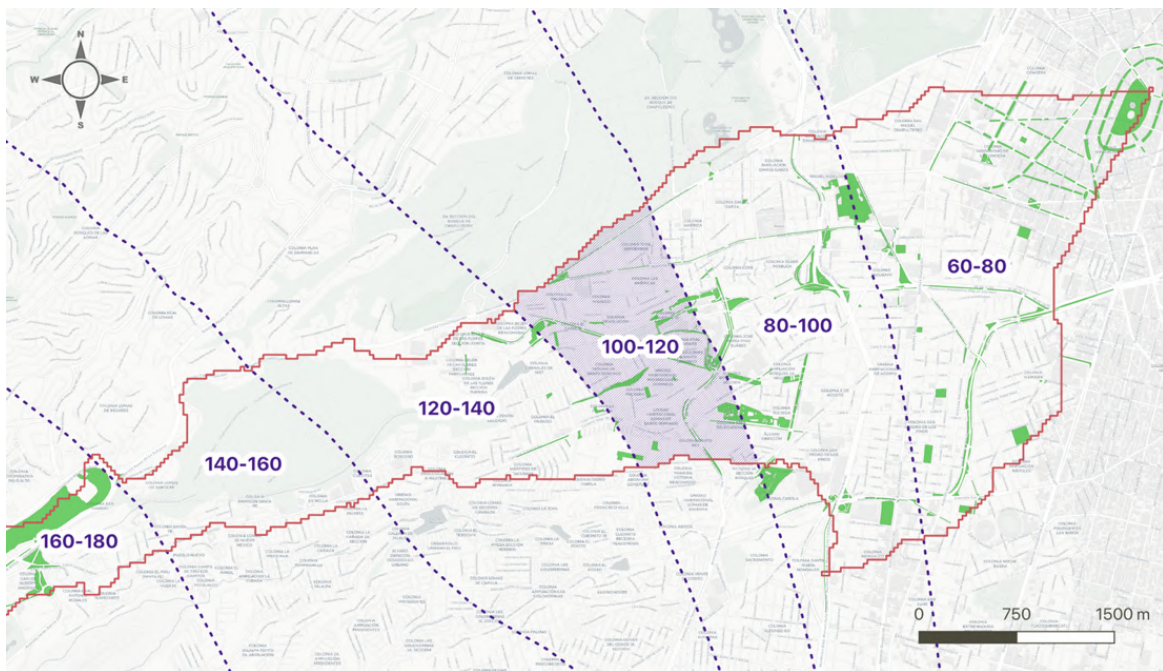


Ilustración 37. Asignación de los rangos de profundidad de agua subterránea. Elaboración propia.

Proximidad a pozos

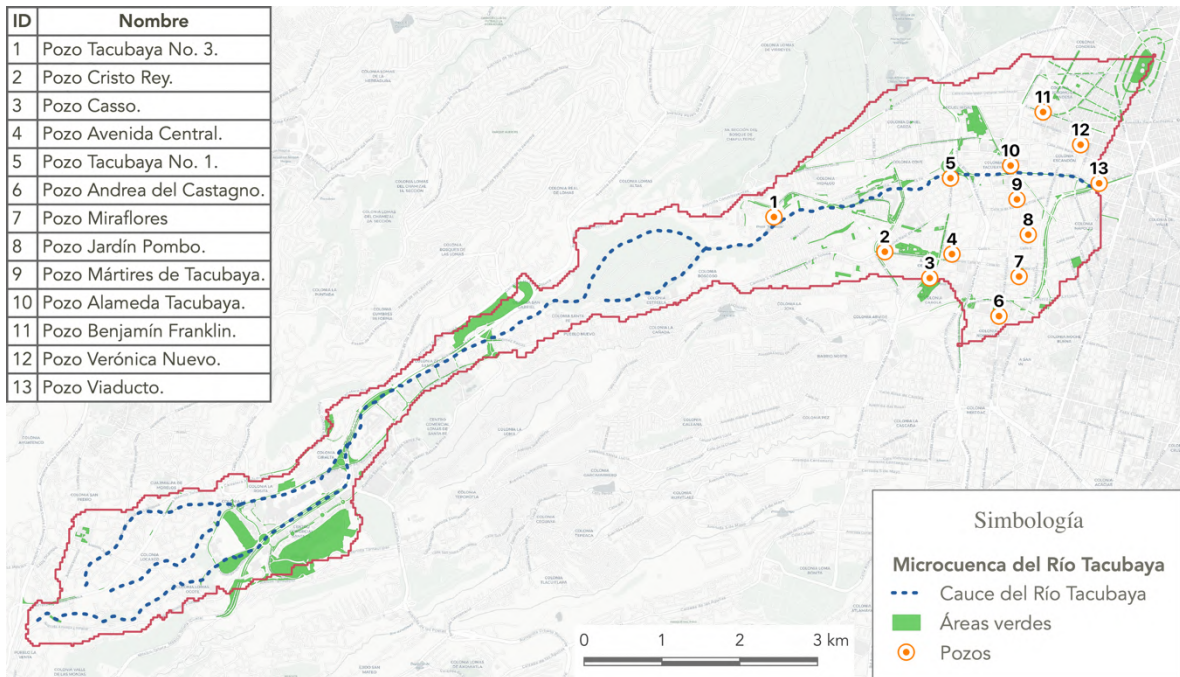


Ilustración 38. Mapa de la ubicación de pozos de extracción de agua en la MRT. Elaboración propia.

Además del nivel del agua subterránea, otro aspecto importante a considerar para implementar infraestructuras verdes que promueven la infiltración de agua al subsuelo es la presencia y concentración de pozos de suministro, ya que es una medida para restringir la intrusión de contaminantes a las fuentes de agua. Específicamente, se encontraron limitaciones para la implementación de pozos de infiltración, donde se indica la distancia mínima de proximidad de 30 metros entre el pozo de infiltración y el pozo de suministro (CEPIS, OPS, 2003; Pima County Regional Flood Control District, 2015). En este sentido, se ubicaron trece pozos dentro del área de estudio que se concentran en las partes bajas de la cuenca, siete de ellos están dentro de los límites de la zona definida como cuenca media y los otros seis en la zona de cuenca baja. La localización de los pozos se obtuvo del conjunto de Datos Aguas Subterráneas de la Zona Hidrogeológica Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Texcoco, Chalco Amecameca, escala 1:100 000, de INEGI. Posteriormente se realizó en QGIS un buffer de 30 metros de radio en cada uno de los puntos donde se ubican los pozos, el cual servirá para identificar

las áreas verdes que tocan o interceptan el área del buffer y si es el caso, se asigna en la tabla de atributos una restricción que indica que se encuentra dentro de distancia mínima hacia los pozos.

Zonas de restricción por contaminación

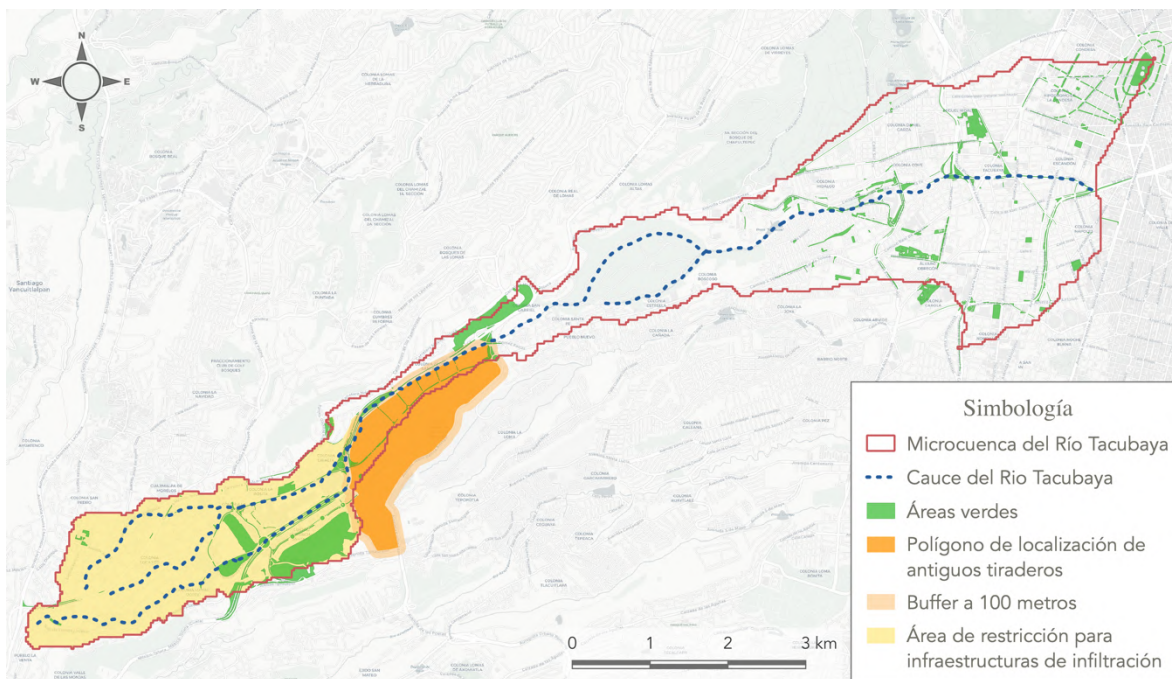


Ilustración 39. Mapa de las áreas restringidas por riesgo de contaminación por lixiviados. Elaboración propia.

A partir de la revisión de la normatividad aplicable para la zona de antiguos tiraderos, se definió un área que restringe la implementación de infraestructuras verdes destinadas a promover la infiltración de agua al subsuelo, pues se considera una medida de protección ambiental importante para prevenir la contaminación de agua subterránea por lixiviados, de acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003. Esta normativa da las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. El área de restricción considera todas aquellas áreas verdes que se encuentran dentro del polígono donde se encontraban concentrados los antiguos tiraderos de basura

más un contorno de amortiguamiento al polígono de 100 metros como medida de seguridad. Además, de acuerdo con la revisión de los lineamientos que se describen en la Norma, se restringen también las infraestructuras de infiltración para las áreas cuenca arriba del área contaminada, pues se considera una medida de protección a los flujos de agua subterránea que también podrían arrastrar lixiviados al pasar por la zona de tiraderos. Ambas zonas de restricción se encuentran marcadas en el mapa en color naranja y amarillo.

Resultados y discusión

Algoritmo de selección de infraestructuras verdes

Una vez que se tienen todas las capas de información de las variables para evaluar la factibilidad de las infraestructuras verdes, se procesaron los datos para trasladar los valores correspondientes a cada uno de los polígonos de área verde dentro de la MRT. Este proceso se realizó con QGIS empleando las herramientas de geoprocésamiento de unión e intersección, con la finalidad de trasladar los datos a cada polígono y asignar el valor para las variables de: superficie (m^2), zona de cuenca (1 = alta, 2 = media, 3 = baja), pendiente media (grados), unidad de infiltración (media, baja o alta), profundidad del nivel freático (metros), restricción por proximidad a pozos (verdadero o falso) y restricción por contaminación (verdadero o falso). Posteriormente, se elaboró una matriz que define los valores que requiere cada tipología en cada una de las variables determinantes para evaluar su factibilidad. Los parámetros se obtuvieron de la información extraída en las fichas técnicas de infraestructuras verdes, y se homologaron los valores y rangos para que puedan ser procesados con respecto a los datos geoespaciales disponibles para el área de estudio. El resultado de la matriz se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4. Matriz de parámetros por tipología de infraestructura verde.

Función	Tipología	Zona cuenca 1:alta 2:media 3:baja	Superficie m ²	Pendiente grados	Infiltración cm/hr Alta: 5-10 Media: 2-5 Baja: <0.25	Nivel freático metros	Restricción proximidad a pozos	Restricción por riesgo contaminación
Tratamiento	Biofiltro	2, 3	>10	< 3	Media-Baja	>1	NO	NO
	Humedales de tratamiento	3	>35	< 5	Baja	>0.6	NO	NO
Infiltración	Jardín microcuenca	1, 2	>8	< 3	Media - Alta	>3	NO	SI
	Jardín de lluvia	1, 2	>18	< 8	Media - Alta	>4	NO	SI
	Pavimento permeable	1, 2	>1	< 3	Media - Alta	>1.2	NO	SI
	Pozo de infiltración	1, 2	> 1.5	< 5	Media-Alta	>11	SI	SI
Retención	Laguna de retención	1, 2	>100	< 5	Media - Alta	>1	NO	SI
	Plaza de agua	1, 3	>100	< 5	Media-Baja	>2	NO	NO
	Suelo esponja	1, 2, 3	>1	< 15	Todas	>0.5	NO	NO
Retraso	Presa filtrante	2	>100	> 15	Media - Alta	>1	NO	NO
	Revegetación de laderas	1, 2	>1	> 15	Media - Alta	>1	NO	NO
	Zanja-bordo	1, 2	>8	> 5, < 22	Media - Alta	>1	NO	NO

A partir de la matriz de parámetros, se construyó un algoritmo de estructura condicional múltiple que permite trazar las rutas para evaluar los parámetros definidos para cada una de las tipologías. Cada una de las rutas o caminos corresponde a una tipología, y su factibilidad se calcula haciendo una comparación mediante operadores lógicos que determinan si existe una coincidencia entre el valor de entrada y el valor definido. Al finalizar el proceso en cada ruta, el algoritmo da la instrucción de asignar un valor *verdadero*, en caso de que los valores de entrada coincidan con los valores definidos en cada ruta, o en caso contrario, indicar que es *falso* cuando no exista correspondencia entre los valores de entrada y el

valor establecido. El proceso de evaluación se esquematiza de manera conceptual en el siguiente gráfico.

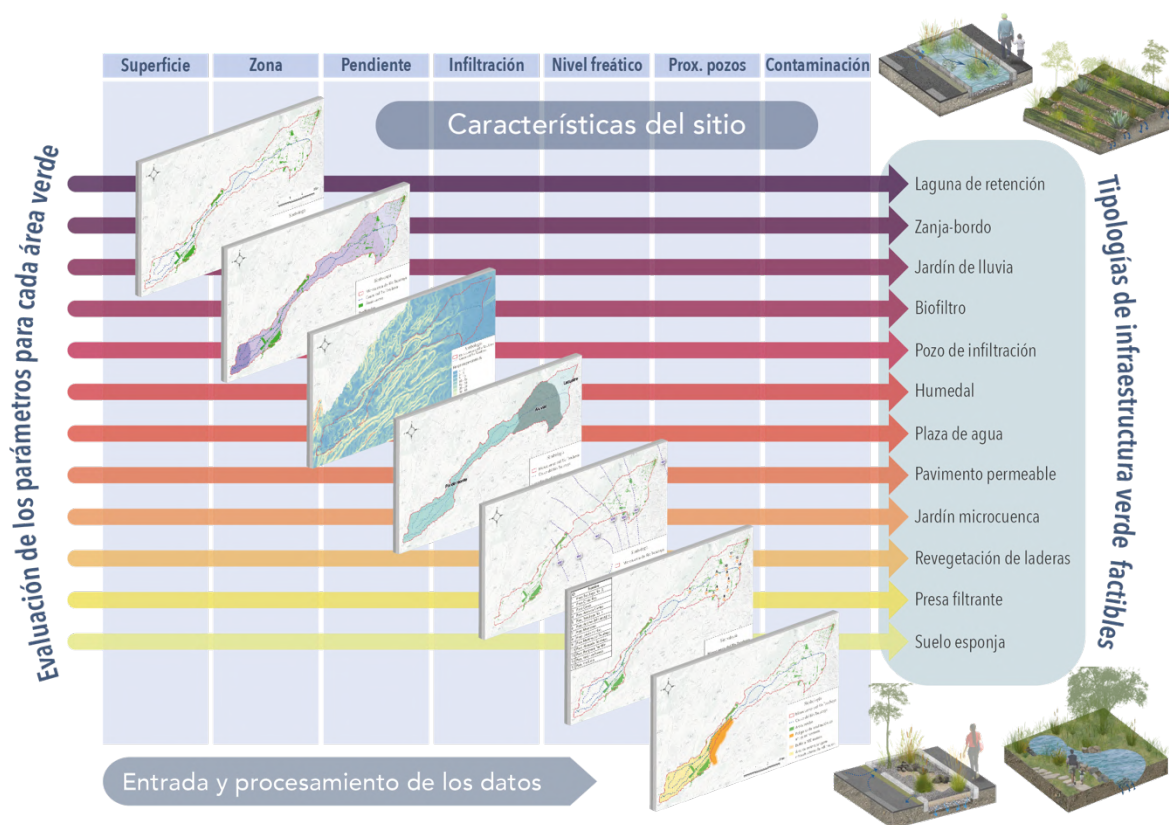


Ilustración 40. Esquema conceptual del proceso de selección de las tipologías factibles.

El algoritmo de selección de tipologías de infraestructura verde se programó en lenguaje **R** versión 4.2.2, y se procesaron los datos geoespaciales de las 543 áreas verdes en la MRT a partir de los parámetros extraídos de la matriz para cada una de las 12 tipologías. La estructura del algoritmo se muestra en el siguiente diagrama de flujo. Tanto el código del algoritmo de selección de tipologías de infraestructura verde, como las bases de datos empleadas se pueden consultar y descargar en el siguiente enlace al repositorio de **GitHub**:

https://github.com/EdaliMurillo/factibilidad_inf_verde

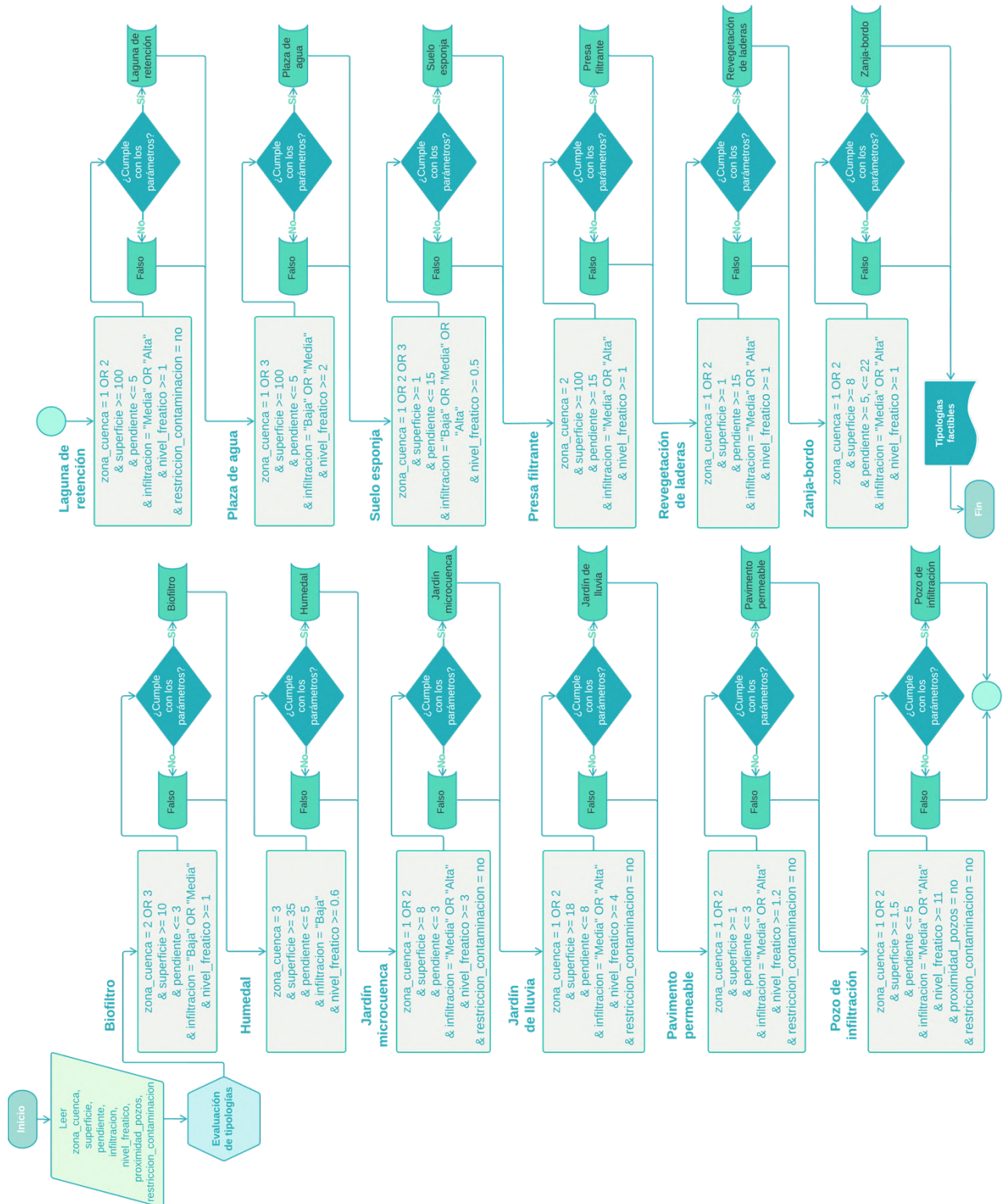


Ilustración 41. Diagrama de flujo del algoritmo de selección de tipologías factibles. Elaboración propia.

Selección de infraestructuras verdes factibles

En esta sección, se presentan y analizan los resultados obtenidos del algoritmo de selección de infraestructuras verdes factibles para intervenir las áreas verdes existentes en la MRT. En la siguiente gráfica, se puede observar el número de veces que se asoció una tipología a un sitio o polígono de área verde. La asociación de tipologías es múltiple, es decir, un mismo polígono puede tener una o varias tipologías factibles en función de que se validen sus parámetros.

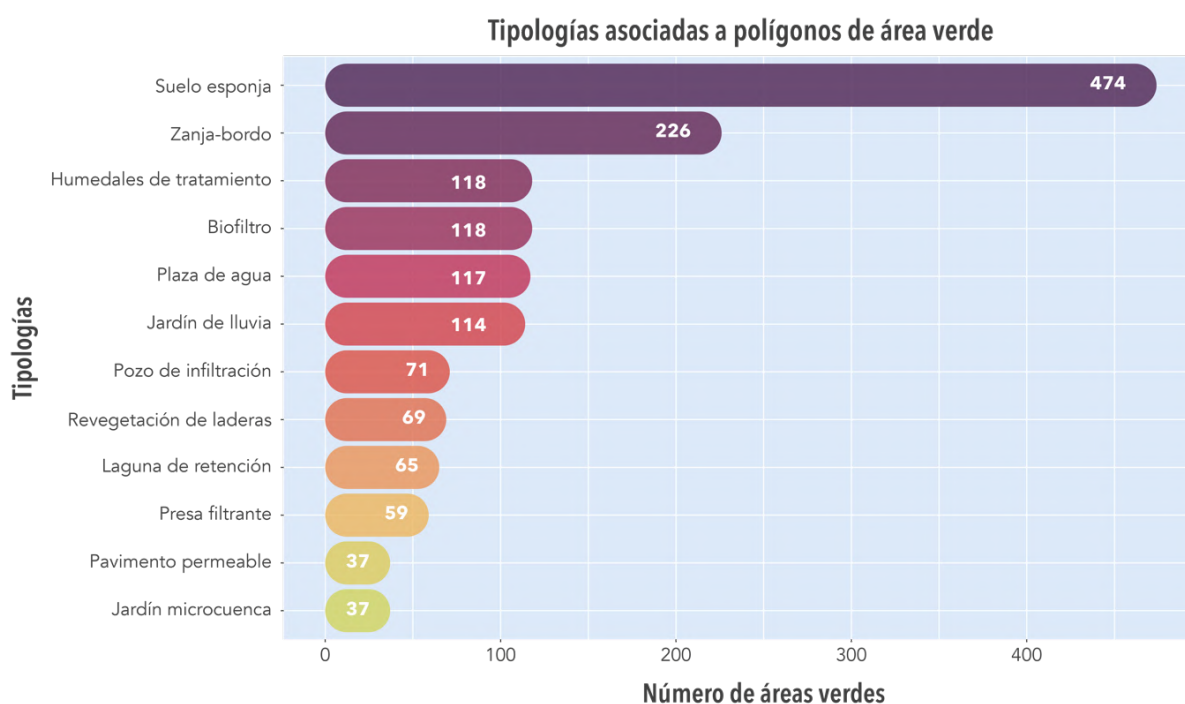


Ilustración 42. Gráfica de resultados de la selección de tipologías factibles para las áreas verdes de la MRT.

En la gráfica se puede observar que la tipología con más asignaciones es “suelo esponja”, pues de los 543 polígonos de áreas verdes presentes en la MRT, el 87% (474 áreas verdes) se evaluaron como sitios aptos para su implementación. Este es un resultado esperado, dado que el suelo esponja es una técnica muy sencilla y adaptable, que permite ser implementada en espacios pequeños, no requiere excavaciones ni construcción, por lo que también es de bajo costo y, además, es independiente del nivel de infiltración del suelo. No obstante, su capacidad de retención de escorrentías es muy limitada a comparación de otras infraestructuras

verdes, especialmente porque la infiltración del agua que se absorbe se queda en la capa más superficial del suelo, donde permanece como humedad y luego se evapora, difícilmente llega percolarse hacia las capas más profundas.

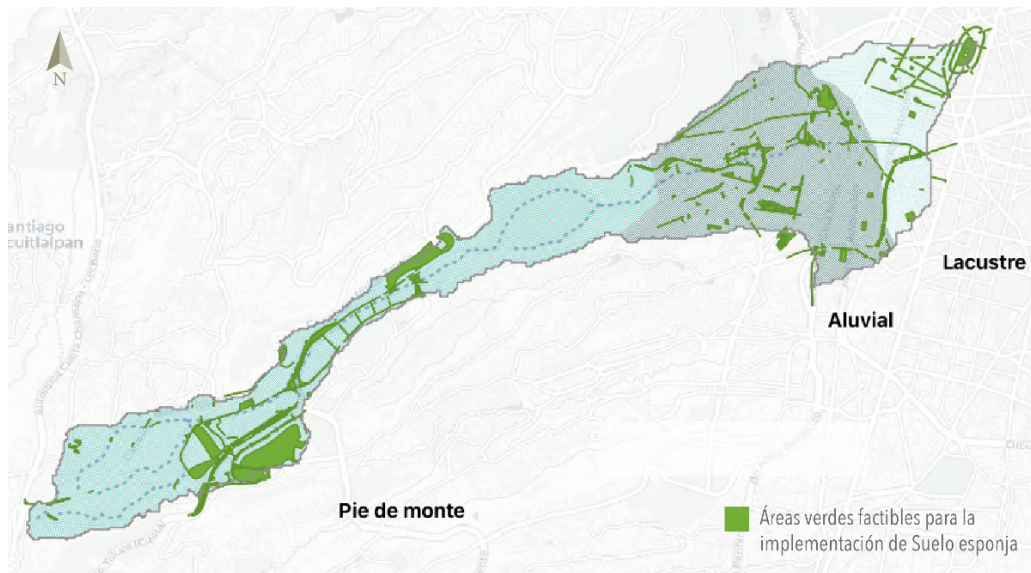


Ilustración 43. Áreas verdes donde resultó factible la implementación de suelo esponja, comparado con las unidades de suelos e infiltración (Pie de monte, Aluvial y Lacustre). Elaboración propia.

Por otro lado, las tipologías que tienen un menor número de sitios aptos para su implementación son el “pavimento permeable” y el “jardín microcuenca”, ambos con 37 asociaciones a polígonos de áreas verdes. Una explicación del resultado es que estas tipologías solo pueden implementarse en superficies llanas y en suelos con altas tasas de infiltración, sin embargo, como se ha mencionado en la caracterización del área de estudio, la zona de planicie en la MRT es coincidente con la acumulación de arcillas impermeables depositadas en el extinto lecho lacustre. Por lo tanto, solo un número reducido de superficies planas al final de la zona de cuenca media en la MRT quedan dentro de los parámetros que podrían ser factibles para su implementación. Tal como se observa en el siguiente mapa, donde se puede notar que las asignaciones de ambas tipologías son coincidentes, incluso comparten los mismos polígonos en la zona media-baja de la MRT.

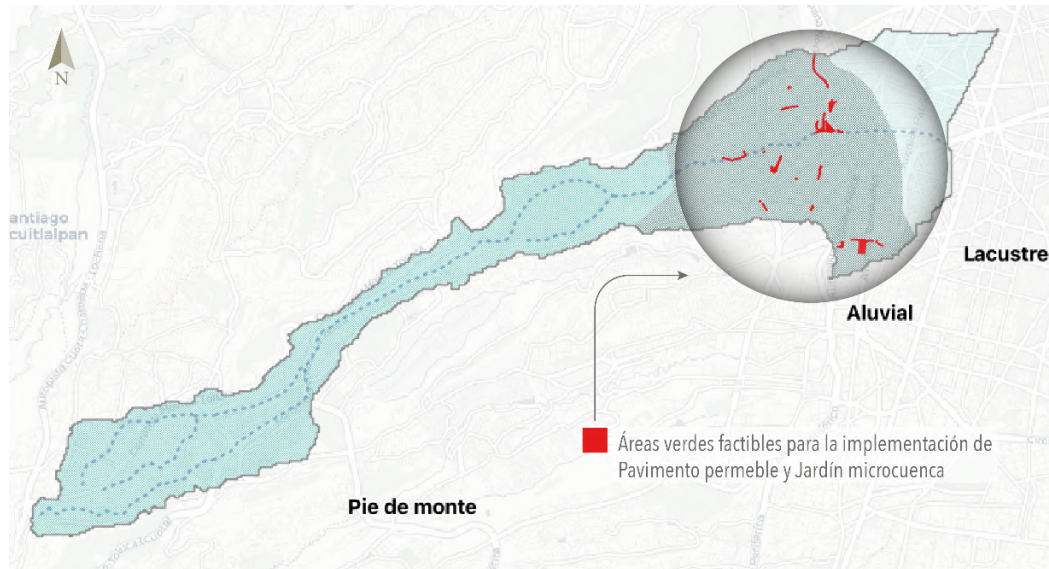


Ilustración 44. Áreas verdes donde resultó factible la implementación de pavimento permeable y jardín microcuenca, en la zona aluvial próxima a la planicie lacustre. Elaboración propia.

Para el análisis de los resultados del resto de las tipologías, es más significativo observar la asignación de las infraestructuras verdes a partir de una división por las zonas funcionales de la microcuenca (alta, media y baja). Esta división permite diferenciar aquellas tipologías que son más adecuadas a las condiciones geológicas e hidrológicas que caracterizan a cada zona, particularmente en los niveles de infiltración y pendiente. Además, la separación por zonas permite realizar una comparativa y verificar si los resultados corresponden con las líneas prospectivas de manejo de escorrentías que fueron planteadas como resultado del análisis y caracterización del área de estudio en la sección previa. En este sentido, se muestran los resultados a través de una gráfica de las tipologías asociadas a áreas verdes agrupadas según la zona funcional de la MRT.

Tipologías asociadas a polígonos de área verde

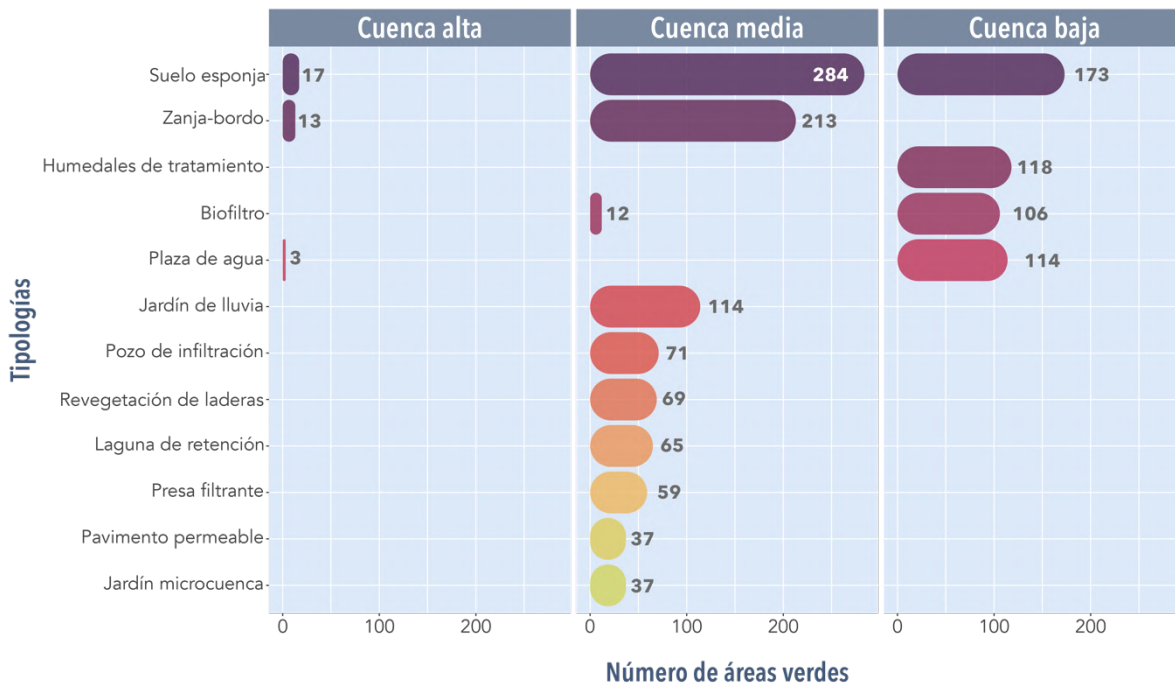


Ilustración 45. Gráfica de asociación de tipologías de infraestructura verde para las áreas verdes en cada una de las zonas de la microcuenca. Elaboración propia.

La zona de cuenca alta tiene un total de 17 polígonos de áreas verdes, mismos que resultaron todos aptos para la implementación de suelo esponja. Por otro lado, 13 de ellos se consideran aptos para la implementación de zanja bordo, y 3 son viables para plazas de agua. Una revisión más cuidadosa de este resultado revela un aspecto determinante que descarta un amplia gama de tipologías, y es que toda la zona de cuenca alta se encuentra en el área de restricción por riesgo de contaminación por lixiviados según las recomendaciones de la NOM-083-SEMARNAT-2003 como se describió en la sección previa, por este motivo la mayoría de las infraestructuras verdes con potencial de infiltración quedan descartadas en el proceso de selección del algoritmo, a pesar de que el resto de los parámetros si podrían ser aplicables a las características de las áreas verdes en esta zona.

En la zona media de la microcuenca se encuentra una mayor variedad de tipologías asignadas. Se contabilizaron un total 353 polígonos de áreas verdes, de los cuales la mayoría resultan ser aptos para la implementación de suelo esponja (284 sitios

factibles), seguido de zanja-bordo con 213 áreas potenciales, y jardín de lluvia con 114 sitios identificados como aptos para su implementación. El resultado de tipologías asignadas se considera acorde con las líneas prospectivas que van orientadas hacia las infraestructuras verdes de retraso (presa filtrante, zanja-bordo), retención (laguna de retención, suelo esponja), infiltración (jardín microcuenca, jardín de lluvia, pavimento permeables, pozo de infiltración) y revegetación de laderas.

Cabe añadir que, aunque no se contempla la estrategia de tratamiento de escorrentías para la cuenca media, resultó factible la tipología de biofiltro en 12 áreas verdes de esta zona. Los sitios que resultaron aptos para esta técnica se ubican en la zona de restricción por contaminación, lo cual es un resultado poco esperado, dado que esta infraestructura verde tiene como requerimiento terrenos planos con pendientes $< 3^\circ$ que no son usuales en esta área. Sin embargo, se considera que esta medida puede ayudar a mitigar los efectos de la contaminación del agua y suelo. Además, la infiltración no es una limitante para esta técnica pues es posible su construcción mediante la colocación de geomembrana u otros materiales impermeables, tal como se señala en su ficha técnica.

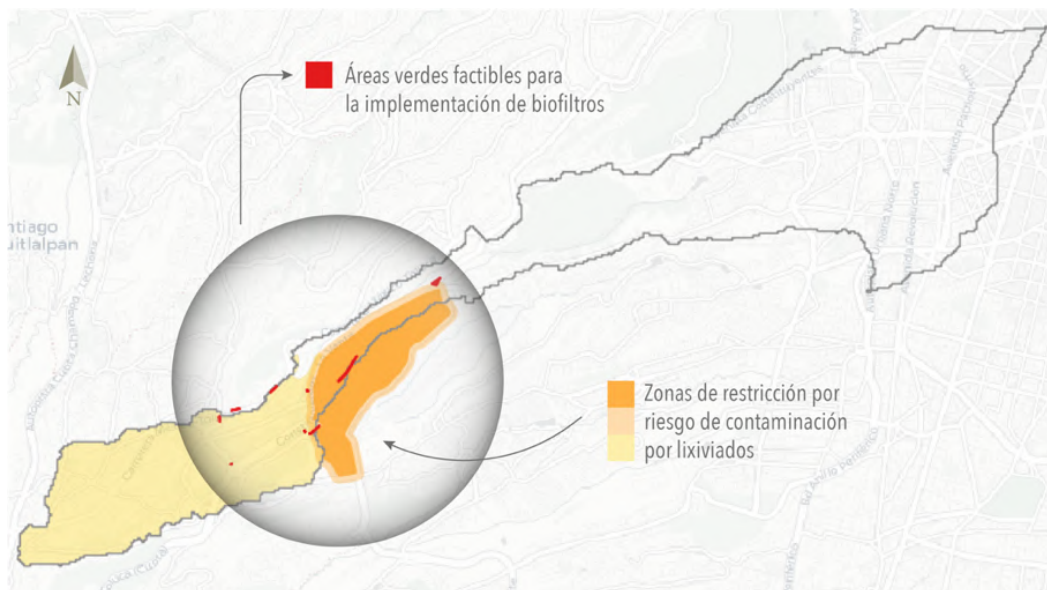


Ilustración 46. Áreas verdes factibles para biofiltros en cuenca media. Elaboración propia.

Finalmente, en la zona de cuenca baja se contabilizaron 173 polígonos de áreas verdes, en los cuales resultó factible para todos los sitios la tipología de suelo esponja. También se observa entre las tipologías un alto número de asociaciones para los humedales de tratamiento en 118 sitios, de biofiltro en 106 sitios y de plazas de agua en 114 sitios. Este resultado es altamente compatible con las estrategias prospectivas para esta zona en la que se prioriza el almacenamiento, el tratamiento de las escorrentías y su posible aprovechamiento para otros usos. Estas tipologías pueden combinarse en un mismo espacio si el tamaño de la superficie lo permite, incluso pueden potenciar sus funciones si se combinan de forma secuenciada e interconectada distintos tipos de infraestructuras verdes de filtrado, depuración y almacenamiento para configurar trenes completos de tratamiento de escorrentías (Rivas, 2019).

Cabe destacar que es necesario hacer una revisión de los resultados con visitas a los sitios para verificar la fidelidad de los datos que se ingresaron al algoritmo, así como la información empleada para la evaluación de las tipologías. En este sentido, es importante observar que los resultados del algoritmo de selección son útiles únicamente a modo exploratorio y orientativo para un proyecto de diseño de infraestructuras verdes, no obstante, es obligatoria la revisión por un equipo de especialistas para todo sitio que se desea intervenir, pues existen factores que no son tomados en cuenta en este ejercicio y que podrían hacer inviable la construcción de las infraestructuras verdes, por ejemplo:

- La cercanía de construcciones o cimientos.
- La presencia de estructuras o instalaciones como postes o mobiliario urbano.
- El paso de redes de tubería o cableado subterráneo.
- Las medidas y espacios de seguridad para el paso de peatones y ciclistas.
- La proximidad a pendientes abruptas o pronunciadas.
- La cercanía a fosas de drenaje séptico.

Las razones por las cuales este proyecto está limitado en estos aspectos se explican por la falta de información sobre el paso de las instalaciones y las redes de infraestructura pública construida, mismas que no son accesibles por motivos de seguridad y confidencialidad. Otro aspecto limitante para este proyecto es la escala y la calidad de los datos encontrados que condicionan la precisión cuando se maneja información espacial a escala local de microcuencia. Específicamente se sugiere la revisión de la ubicación de pozos para determinar con exactitud la localización de los puntos y poder tener resultados confiables para la estimación de la distancia mínima de 30 metros respecto a las infraestructuras de recarga como los pozos de infiltración. También, es necesaria la revisión en el sitio de la información obtenida de las capas de edafología y de pendiente, pues ambas se encuentran a una escala mayor que resulta poco fiable para definir las características de áreas tan pequeñas como son los camellones, jardineras o arriates, por lo que se requieren datos más finos para poder analizar estos sitios.

Por último, en los manuales de construcción y diseño de infraestructuras verdes consultados se recomienda ampliamente hacer estudios geotécnicos para tener información precisa y actualizada sobre la estructura y la estabilidad de los estratos en la zona que se va a intervenir (Pima County, 2015). Este punto se considera crucial por dos razones, la primera es que se sabe que la zona de Santa Fe y el cauce del Río Tacubaya fueron áreas donde se ubicaron minas de explotación arena durante la primera mitad del siglo XX (González Reynoso A. , 2014), que modificaron drásticamente el relieve natural y dejaron a su paso socavones de más de 100 metros de profundidad, así como túneles subterráneos que no están plenamente ubicados y que podrían generar riesgo de colapsos por la presencia de oquedades y cavernas (PAOT, 2010). La segunda razón que resalta la necesidad de estudios sobre el suelo en la MRT es que hacen falta pruebas y parámetros actualizados para determinar la capacidad de infiltración, especialmente para aquellas tipologías en las que se busca incrementar la recarga del agua subterránea como los pozos de infiltración o los pavimentos permeables. Se sugieren pruebas

en el sitio que se desea intervenir utilizando un infiltrómetro de doble anillo o un método equivalente; así como también son deseables estudios detallados sobre la profundidad y textura de los suelos, el nivel freático durante estaciones altas, la presencia de capas compactadas o de arcillas expansivas (Pima County, 2015). Estos aspectos se consideran mejoras y próximos pasos para la continuidad a este proyecto, pues los alcances de tiempo y recursos del presente trabajo son limitados, por lo que fueron tomados en cuenta únicamente los principales factores físicos, hidrogeológicos y ambientales con información pública y disponible.

Herramienta web para la visualización de los resultados

Con la finalidad de mostrar los resultados del algoritmo de selección de infraestructuras verdes, se diseñó un geovisualizador interactivo en **Shiny**, que es una herramienta para la programación en **R** que permite crear aplicaciones web, así como incorporar tableros interactivos y visualizadores con datos geoespaciales (<https://shiny.rstudio.com/>). El insumo principal para este programa fue la información generada a partir del algoritmo de selección de tipologías factibles para los polígonos de áreas verdes en la MRT. Para consultar la herramienta web se puede acceder desde cualquier navegador con la siguiente URL:

https://edalimurillo.shinyapps.io/factibilidad_infraestructuras/

A continuación, se presenta una gráfica esquemática que muestra la estructura y disposición de los elementos que componen la interfaz diseñada para esta herramienta. Posteriormente se describe la funcionalidad e interactividad de cada uno de sus componentes. También es posible acceder a la consulta y descarga del código de la aplicación, así como a las bases de datos que se utilizaron a través del repositorio de **GitHub** de forma libre y abierta en:

https://github.com/EdaliMurillo/factibilidad_inf_verde



Ilustración 47. Esquema de los elementos que componen la interfaz de la herramienta interactiva para la consulta de infraestructuras verdes factibles en las áreas verdes de la MRT. Elaboración propia.

Para esta herramienta web se diseñó una interfaz sencilla, con pocos elementos y descripciones sintetizadas. Se añadió interactividad entre los diferentes elementos con la intención de hacerla intuitiva y atractiva en cuanto a su funcionalidad y apariencia. Por esta razón, se descartó el uso de lenguaje técnico y acrónimos, pues se concibió como un producto de información que brinda servicios de consulta a un grupo amplio de usuarios de diferentes sectores y formaciones, y no necesariamente académico. Esta herramienta da un servicio de consulta al usuario, en el cual es posible acceder a la información a través de dos aproximaciones:

- La primera es seleccionando alguno de los polígonos de áreas verdes que se encuentran en la MRT, esta opción desplegará un par de gráficas que brindan información sobre las características del sitio seleccionado, por un lado, se mostrará la gráfica de precipitación mensual media con la información de la estación climatológica más cercana, y a un costado se activará una imagen que muestra un mapa 3D que señala la zona funcional de la cuenca donde se ubica el polígono seleccionado. En la parte inferior se activará una serie de fichas que muestran las tipologías que resultaron factibles para el área verde seleccionada, cada una cuenta con una imagen ilustrativa de la infraestructura verde, el nombre de la tipología y una breve descripción.
- La segunda opción de consulta es a través del panel de selección en el costado izquierdo de la pantalla, donde se pueden activar y desactivar las casillas por tipología. Esta acción ejecuta un filtro de consulta hacia la base de datos para mostrar en el mapa únicamente aquellos polígonos de áreas verdes donde resultó factible la tipología seleccionada. Este menú permite consultar una o más opciones de tipologías y al final de la lista de casillas se añade un botón para limpiar la selección, este evento muestra nuevamente todas las áreas verdes en la MRT y da la posibilidad de volver a la primera opción de consulta de información que se hace desde el mapa dando click a cada una de las áreas verdes. Por último, al seleccionar un conjunto de tipologías en las casillas, el usuario podrá descargar a su ordenador las fichas técnicas de las infraestructuras verdes consultadas.

Como se observa en el esquema, la interfaz se compone por 5 elementos interactivos y reactivos, cuya funcionalidad se describe a continuación.

- 1. Mapa Interactivo:** El principal elemento es el mapa interactivo que muestra el área de estudio y localización de la MRT, en el cual se muestran los polígonos de áreas verdes que se analizaron con el algoritmo de selección de tipologías. Cuando el usuario hace click en cualquiera de los polígonos de

áreas verdes se despliega una nube de información (pop-up) que muestra las características del sitio, como la categoría de área verde, la pendiente, la categoría de infiltración y el nivel freático. Con respecto a la semiótica que facilita la interacción con el usuario, se añadió un cambio de color en el contorno de cada polígono para indicar que el área ha sido seleccionada.

2. **Filtros por tipología:** Es un elemento “checkbox” que permite hacer peticiones a la base de datos a partir de que el usuario activa la casilla con la tipología de su interés. Esta opción de consulta brinda al usuario una opción de filtrado para visualizar en el mapa los sitios donde una cierta tipología resultó factible. Al finalizar la consulta se añadió un botón que permite descargar las fichas técnicas de las tipologías seleccionadas.
3. **Gráfica de precipitación:** A partir de los datos obtenidos de las normales de precipitación mensual de las 6 estaciones climatológicas en la MRT, se elaboraron gráficas que muestran el acumulado mensual de cada estación. La asignación de la estación más cercana hacia los polígonos de áreas verdes se realizó desde QGIS con la herramienta de cálculo de polígonos de Voronoi, a partir de los puntos de ubicación de cada estación.
4. **Mapa 3D de zonas:** Los mapas 3D son gráficos con una funcionalidad reactiva que llama a la imagen a partir de la zona donde se localiza el área verde que se ha seleccionado. Estos mapas se realizaron con la paquetería *Rayshader* de *R* y el modelo digital de elevaciones del cuadrante de la zona de estudio, posteriormente se editó en *illustrator* para agregar la simbología.
5. **Tipologías factibles:** en esta sección se muestra un carrusel de imágenes esquemáticos que se elaboraron para ilustrar las diferentes tipologías junto con una breve descripción de cada infraestructura verde. Este es un elemento reactivo, pues la selección del área verde en el mapa llama a las imágenes de las tipologías que se asignaron a partir del algoritmo de selección, por otro lado, es interactivo ya que permite recorrer cada una de las tipologías factibles a partir de botones laterales que van cambiando la visualización de cada tipología factible y su descripción.

Finalmente se añade también en el panel lateral izquierdo un texto descriptivo muy breve sobre la funcionalidad de la herramienta y dos textos con hipervínculos, uno de ellos lleva al usuario hacia el repositorio donde podrá acceder al código, imágenes y base de datos en el repositorio de **GitHub**. El otro vínculo conduce hacia una carpeta de **Drive** donde podrá descargar el presente documento y conocer los métodos e información que se desarrollaron para la creación de esta herramienta.

Conclusiones

La aplicación web (app) de selección de infraestructuras verdes factibles en la MRT es un producto de información en construcción, que puede ser mejorado de forma continua y está pensada como prueba inicial para poder aplicarse a una escala mayor. De este modo, un siguiente paso para ampliar su funcionalidad sería ingresar los parámetros y la información para toda la región de barrancas en la Ciudad de México. Por esta razón, tanto el código como los datos empleados se ponen a disposición libre para su consulta de tal forma que cualquier persona interesada pueda descargarlo y utilizarlo como base para configurarlo de acuerdo a sus propios proyectos.

Realizar este proyecto implicó muchos retos relacionados a la búsqueda y procesamiento de la información disponible. En principio, se reconoce que hacen falta datos e información técnica sobre el diseño y construcción de una mayor variedad de tipologías de infraestructura verde, por lo que la selección inicial de las tipologías a evaluar estuvo limitada ante la falta de documentación técnica que especifique los parámetros de construcción y diseño. Otra limitante de información es que los parámetros técnicos de construcción hayan sido evaluados para las condiciones y contexto de la Ciudad de México, pues la mayoría de las fuentes de información refieren a experiencias constructivas en otras regiones o países. Un siguiente paso necesario sería compilar información técnica de construcción y

diseño con especialistas que trabajen en la Ciudad de México, con la finalidad de aumentar el número de tipologías en el algoritmo y abrir el abanico de opciones en la selección de infraestructuras verdes viables.

Es claro que este trabajo está limitado en alcances, recursos y tiempo para poderse escalar, sin embargo, sería útil para los usuarios y planificadores aumentar las funcionalidades del algoritmo diseñado, con el objetivo de poder estimar cuál es la combinación óptima de tipologías de infraestructura verde de acuerdo con estrategias y propósitos específicos. En este sentido, una de las funcionalidades más útil para los planificadores urbanos, sería integrar modelos ya existentes que calculan la capacidad de las infraestructuras para manejar distintos volúmenes de agua en función de su tamaño y las características del sitio. También, sería de utilidad explorar la integración de estas infraestructuras verdes con infraestructuras grises, por ejemplo, para la canalización de las escorrentías captadas hacia plantas de tratamiento, donde podrían mejorar su calidad y convertirse en una fuente de abasto de agua que pueda aprovecharse para otros usos dentro de la zona.

Por otro lado, es importante tener a consideración que la implementación de infraestructuras verdes desde un enfoque de microcuencas urbanas es un reto a nivel de gestión de gran importancia, pues en la mayoría de los casos, las delimitaciones hidrográficas trascienden los límites político-administrativos. Debido a esto, la planificación e implementación de una red de infraestructuras verdes en microcuencas urbanas requerirá de la articulación de múltiples sectores para llevarse a cabo de forma coordinada. Dicha gestión puede llevar más tiempo y recursos para crear consenso, acuerdos y negociaciones entre las diferentes partes, e incluso un trabajo previo de sensibilización y comunicación para aumentar la conciencia y la aceptación de la infraestructura verde por parte de la sociedad y los responsables políticos.

Por último, se hace una reflexión sobre el importante papel que tiene el sector académico como facilitador de la información y el conocimiento generado, ya que

es una responsabilidad de contribución que debemos a la sociedad. Por este motivo, se plantea la necesidad de integrar nuevas perspectivas de visualización y divulgación de los resultados de las investigaciones que estén orientados a la creación de herramientas y servicios de consulta de la información como un medio para lograr la transferencia del conocimiento a otros sectores, y que debe de hacerse de una manera abierta, sencilla y comprensible. Esta propuesta se fundamenta en la importancia de compartir y dinamizar la transferencia del conocimiento técnico y científico mediante herramientas gratuitas, accesibles e innovadoras, como una vía para lograr la construcción de sociedades donde todas y todos puedan acceder libremente a la información.

Bibliografía

- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (1 de diciembre de 1992). Ley de Aguas Nacionales. *última Reforma DOF 06-01-2020*. Estados Unidos Mexicanos.
- Calderón-Contreras, R., & Quiroz-Rosas, L. E. (2017). Analysing scale, quality and diversity of green infrastructure and the provision of Urban Ecosystem Services: A case from Mexico City. *Ecosystem services*, 23, 127-137.
- CEPIS, OPS. (2003). *Especificaciones técnicas para el diseño de zanjas y pozas de infiltración*. Obtenido de Organización Mundial de la Salud: https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/UNATSABAR%202005.%20Especificaciones%20t%C3%A9cnicas%20para%20el%20dise%C3%B1o%20de%20zanjas%20y%20pozas%20de%20.pdf
- CONAGUA. (18 de agosto de 2009). *NORMA Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003*. Obtenido de Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada: https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5105753
- CONAGUA. (2016). Drenaje Pluvial Urbano. Libro 19. En C. N. Agua, *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Ciudad de México: SEMARNAT, Gobierno de la República.
- CSIRO. (2006). *Urban Stormwater: Best Practice Environmental Management Guidelines*. Obtenido de CSIRO PUBLISHING: <https://www.publish.csiro.au/ebook/download/pdf/2190>
- Luyando López, E. (2016). *Efectos de las temperaturas y precipitaciones extremas en el bioclima Humano de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México por cambio climático local y global. Tesis que para obtener el grado de Doctora en Geografía*. México, D.F.: Posgrado en Geografía, UNAM.

- Aparicio Mijares, J., Lafragua Contreras, J., Gutiérrez Lopez, A., Mejía Zermeño, R., & Aguilar Garduño, E. (2006). *Evaluación de los recursos hídricos: elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas*. Montevideo, Uruguay: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. UNESCO.
- AEP. (2016). *Hacia una Ciudad de México sensible al agua. El espacio público como una estrategia de gestión de agua de lluvia*. Ciudad de México. Autoridad del Espacio Público: Gobierno de la Ciudad de México.
- Asamblea General de las Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Nueva York: ONU.
- Burns, E., Moctezuma Barragán, P., Monroy Hermosillo, O., Breña Puyol, A. F., Espinoza Hilario, D. C., Espinoza Hilario, J., . . . Pulido Jiménez, M. (2009). *Repensar la Cuenca: La Gestión de Ciclos del Agua en el Valle de México*. Universidad Autónoma Metropolitana. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Deltares. (s.f.). *Climate Resilient City Tool (CRCTool)*. Obtenido de <https://www.deltares.nl/en/software/climate-resilient-city-tool/>
- Diario Oficial de la Federación. (03 de febrero de 1997). *NORMA Oficial Mexicana NOM-003-CNA-1996*. Obtenido de Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4866103&fecha=03/02/1997#gsc.tab=0
- Diario Oficial de la Federación. (20 de octubre de 2004). *NORMA Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003*. Obtenido de Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=658648&fecha=20/10/2004#gsc.tab=0
- Diario oficial de la Federación. (18 de agosto de 2009). *NORMA Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003, Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada*. Obtenido de SEMARNAT: <https://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/NOM-014-CONAGUA-2003.pdf>
- Dunn, A. D., & Stoner, N. (2007). Green Light for Green Infrastructure. *Pace Law Faculty Publications*(494), <https://digitalcommons.pace.edu/lawfaculty/494>.
- EPA. (s.f.). *Storm Water Management Model (SWMM)*. Obtenido de United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>
- Ezcurra, E., Mazari-Hiriart, M., Pisanty, I., & Aguilar, A. (2005). *La cuenca de México. Aspectos ambientales críticos y sustentabilidad*. Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica.
- FAO. (s.f.). *Servicios ecosistémicos y biodiversidad*. Recuperado el noviembre de 2022, de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: <https://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/background/culturalservices/es/>
- Global Water Partnership. (2000). *Manejo integrado de recursos hídricos*. Estocolmo, Suecia: TAC Background papers No.4.

- Gaceta Oficial del Distrito Federal. (1 de diciembre de 2011). *Decreto por el que se Declara como Área de Valor Ambiental del Distrito Federal, con la categoría de barranca, a la denominada "Barranca Mimosas"*. Obtenido de Administración Pública del Distrito Federal:
https://paot.org.mx/centro/leyes/df/pdf/GODF/GODF_01_12_2011.pdf
- Gaceta Oficial del Distrito Federal. (28 de noviembre de 2012). *Decreto por el que se declara como Área de Valor Ambiental del Distrito Federal, con la categoría de barranca, a la denominada "Barranca Tacubaya"*. Obtenido de
http://www.sadsma.cdmx.gob.mx:9000/datos/storage/app/media/av_decretos/barranca_Tacubaya_28112012.pdf
- GIFMOD. (junio de 2016). *Green Infrastructure Flexible Model*. Obtenido de
<https://gifmod.com/>
- González Reynoso, A. (septiembre de 2014). *Santa Fe: las conflictivas soluciones emergentes a las carencias básicas de agua y drenaje en un polo de la economía global en la ciudad de México*. Obtenido de XI Simposio de la Asociación Internacional de Planificación Urbana y Ambiente (UPE 11) (La Plata, 2014):
<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/56119>
- González Reynoso, A. E., Hernández Muñoz, L., Perló Cohen, M., & Zamora Saenz, I. (2010). *Rescate de Ríos Urbanos. Propuestas conceptuales y metodológicas para la restauración y rehabilitación de ríos*. Ciudad de México: UNAM, Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad.
- Gonzalez-Mora, M. F., Cervantes-Victoria, G. I., & Boyas-Martinez, E. (2020). *DETERMINACIÓN DE SITIOS POTENCIALES DE RECARGA ARTIFICIAL DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LOS ACUÍFEROS QUE CONFORMAN LA SUBREGIÓN VALLE DE MÉXICO*. Ciudad de México: Centro de investigación en ciencias de información geoespacial.
- Gómez Flores, L., Cruz Flores, A., Servín Vega, M., & Chávez González, S. (19 de julio de 2016). Tromba provoca inundaciones, deslave y daños a autos y casas. *La Jornada*.
- GWP Central America. (2013). *Guía para la aplicación de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) a nivel municipal*. Tegucigalpa, Honduras: Global Water Partnership.
- GWP. (6 de noviembre de 2018). *About IWRM*. Recuperado el agosto de 2020, de Global Water Partnership: <https://www.gwp.org/en/gwp-SAS/ABOUT-GWP-SAS/WHY/About-IWRM/>
- INEGI. (2010). *Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas. SIATL. Versión 3.2*. (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) Recuperado el noviembre de 2019, de Plataforma de SIATL: http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#
- Instituto de Planeación Democrática y Prospectiva. (17 de marzo de 2022). *Portal de Datos Abiertos de la Ciudad de México*. Obtenido de Geología de la Ciudad de México: <https://datos.cdmx.gob.mx/dataset/geologia-de-la-ciudad-de-mexico>
- Instituto de Planeación Democrática y Prospectiva de la Ciudad de México. (14 de febrero de 2023). *Portal de Datos Abiertos de la Ciudad de México*. Obtenido de Uso de Suelo y Vegetación 2020, Ciudad de México: <https://datos.cdmx.gob.mx/dataset/uso-de-suelo-y-vegetacion-2020-ciudad-de-mexico>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2019). *Carta hidrológica aguas subterráneas México: informe técnico: escala 1:1 000 000 serie II*. Obtenido de

- https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825109639.pdf
- Jefatura de Gobierno. (04 de mayo de 2012). *DECRETO QUE CONTIENE EL PROGRAMA PARCIAL DE DESARROLLO URBANO DE LA “ZONA SANTA FE” DE LOS PROGRAMAS DELEGACIONALES DE DESARROLLO URBANO PARA LAS DELEGACIONES ÁLVARO OBREGÓN Y CUAJIMALPA DE MORELOS*. Obtenido de Gaceta Oficial del Distrito Federal :
http://www.data.seduvi.cdmx.gob.mx/portal/docs/transparencia/articulo15/fraccionxi/PPDU/PPDU_AO/PPDU_ZONA-SANTA-FE_AO-CM.pdf
- Macro, K., Matott, L., Rabideau, A., Ghodsi, S., & Zhu, Z. (2019). OSTRICH-SWMM: A new multi-objective optimization tool for green infrastructure planning with SWMM. *Environmental Modelling & Software*, 113, 42-47.
- Ministry of Water Resources. (septiembre de 2007). *Manual on artificial recharge of ground water*. Obtenido de Government of India:
<http://cgwb.gov.in/documents/Manual%20on%20Artificial%20Recharge%20of%20Ground%20Water.pdf>
- Naciones Unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Santiago: (LC/G.2681-P/Rev.3).
- PAOT. (diciembre de 2010). *Ocupación irregular y riesgo socio-ambiental en barrancas de la delegación Álvaro Obregón, Distrito Federal*. Obtenido de Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F.:
<http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/estudios/EOT-04-2010.pdf>
- Pima County. (marzo de 2015). *Low Impact Development and Green Infrastructure Guidance Manual*. Obtenido de City of Tucson:
https://webcms.pima.gov/UserFiles/Servers/Server_6/File/Government/Flood%20Control/Floodplain%20Management/Low%20Impact%20Development/li-gi-manual-20150311.pdf
- Pima County Regional Flood Control District. (Noviembre de 2015). *Design Standards for Stormwater Detention and Retention*. Obtenido de Runoff Detention Systems:
https://webcms.pima.gov/UserFiles/Servers/Server_6/File/Government/Flood%20Control/Rules%20and%20Procedures/Stormwater%20Detention-Retention/dssdr-manual-board-version-201511.pdf
- Portal de Datos Abiertos. (2021). *Zonas de cuenca*. Obtenido de IPDP:
<https://datos.cdmx.gob.mx/dataset/zonas-de-cuenca>
- Portal de datos abiertos. (15 de febrero de 2023). *Atlas de Riego de Inundaciones*. Obtenido de Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil:
<https://datos.cdmx.gob.mx/dataset/atlas-de-riesgo-inundaciones/resource/393b3552-48f2-4208-8798-82dd610a87d9>
- Portal de Datos Abiertos de la Ciudad de México. (14 de febrero de 2023). *Atlas de riesgo - Susceptibilidad por laderas*. Obtenido de Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil: <https://datos.cdmx.gob.mx/dataset/atlas-de-riesgo-susceptibilidad-por-laderas>
- Portal de medios de la Presidencia. (2 de abril de 2019). *AMLO* . Obtenido de Presentan proyecto del Complejo Cultural del Bosque de Chapultepec:
<https://lopezobrador.org.mx/2019/04/02/presentan-complejo-cultural-del-bosque-de-chapultepec/>

- PUEC, UNAM; Fondo Metropolitano del Valle de México. (2011). *Programa de Ordenación de la Zona Metropolitana del Valle de México*. Obtenido de Versión preliminar: <http://www.economia.unam.mx/cedrus/descargas/POZMVM.pdf>
- Quiroz Benítez, D. E. (2018). *Implementación de Infraestructura Verde como estrategia para la mitigación y adaptación al cambio climático en ciudades mexicanas, hoja de ruta*. Ciudad de México: SEDATU, SEMARNAT, GIZ.
- Ruíz Abarca, F. O., & Monroy Martínez, V. (2013). Del mito a la realidad. El manejo de agua de lluvia en la ciudad de México. *Revista Ciencias*(107-108), 38-45.
- Sacmex. (2012). *Programa de gestión integral de los recursos hídricos, visión 20 años*. Ciudad de México: Sistema de Aguas de la Ciudad de México, Gobierno del Distrito Federal, Secretaría del Medio Ambiente.
- SACMEX. (2017). *Gobierno de la Ciudad de México*. Obtenido de Operación y problemática de las presas en la zona poniente de la Ciudad de México: <http://bioicm.cicm.org.mx/wp/wp-content/uploads/2017/03/presentacionproblematicapresazonaponienteactual.pdf>
- SACMEX. (2018). *Diagnóstico, logros y desafíos*. Ciudad de México: D.R. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Helios Comunicación, S.A. de C.V.
- Secretaría del Medio Ambiente. (Febrero de 2022). *Programa Especial de Infraestructura Verde de la Ciudad de México*. Recuperado el Enero de 2023, de https://plazapublica.cdmx.gob.mx/uploads/decidim/attachment/file/343/220524__Programa_Especial_de_Infraestructura_Verde-CDMX-1-88.pdf
- SEDEMA. (25 de 07 de 2019). *Regionalización de Áreas Verdes*. Obtenido de IDEGEO. Infraestructura de datos espaciales de CentroGeo.: http://pgot.centrogeo.org.mx/layers/geonode:regionalizacion_areas_verdes/pdf_metadata_layer
- SEDEMA. (julio de 2022). *Programas. Infraestructura Verde*. Obtenido de Dirección de Infraestructura Verde: <https://sedema.cdmx.gob.mx/programas/programa/infraestructura-verde#:~:text=El%20Programa%20Especial%20de%20Infraestructura,las%20etapas%20de%20su%20desarrollo>.
- Shahed Behrouz, M., Zhu, Z., Matott, L., & Rabideau, A. (s.f.).
- SIAPA. (febrero de 2014). *Lineamientos Técnicos para Factibilidades*. Obtenido de CAP.5 INFILTRACION PLUVIAL : https://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/capitulo_5_infiltracion_pluvial.pdf
- Sixtos, G. M. (2017). Santa Fe: de minas y tiraderos a centro financiero. En B. V. Carrasco-Gallegos, *Megaproyectos urbanos y productivos. Impactos socio-territoriales*. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Soto Montes de Oca, G., & Herrera Pantoja, M. (2019). *Cambio climático y agua en ciudades: impactos en la Ciudad de México. Aspectos científicos y políticas públicas*. Ciudad de México: UAM, Unidad Cuajimalpa.
- Suárez, A., Camarena, P., Herrera, I., & Lot, A. (2011). *Infraestructura verde y corredores ecológicos de los pedregales: ecología urbana del sur de la Ciudad de México*. Ciudad Universitaria: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Torres Bernardino, L. (2017). *La gestión del agua potable en la Ciudad de México. Los retos hídricos de la CDMX: Gobernanza y sustentabilidad*. México, D.F.: Instituto Nacional de Administración Pública, A.C.

- WWAP/ONU-Agua. (2018). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua*. París: UNESCO.
- Yocum, D. (2006). *Manual de Diseño: Humedal construido para el tratamiento de las aguas grises por biofiltración*. Obtenido de Universidad De California: <https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/Manual-de-Dise--o-para-Biofiltro.pdf>
- Yu, K., Li, D., You, H., & Xu, L. (2016). Urban green spaces, their spatial pattern, and ecosystem service value: The case of Beijing. *Habitat International*(56), 84-95.

Fuentes de los datos

- CICESE (2018). CLICOM. Obtenido de Base de Datos Climatológica Nacional: <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>
- Dirección General de Geografía y Medio Ambiente INEGI. (sin fecha). Cálculo de gasto o caudal. Recuperado el 10 de marzo de 2022, de https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/PDF/CalculoGasto.pdf
- GeoComunes. (2015). 3.1.6. Red de drenaje zona metropolitana. http://132.248.14.102/layers/CapaBase:iii_1_6_red_drenajedf
- INECC. (2014). Análisis de la relación entre la precipitación máxima anual, el cambio de uso de suelo y la respuesta hidrológica en cuencas costeras del Pacífico Tropical Mexicano. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/98112/CGACC_2014_Precipitacion_maxima_anual.pdf
- INEGI (2021). Marco geoestadístico, censo de población y vivienda 2020. Recuperado el 04 de abril de 2022, de <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/?t=213>
- IPDP. (2021). Inventario de Áreas Verdes. Recuperado el 04 de abril de 2022, de <https://datos.cdmx.gob.mx/dataset/inventario-de-areas-verdes-en-la-ciudad-de-mexico>
- OSM. (2021). QuickOSM. Recuperado el 04 de abril de 2022, de <https://docs.3liz.org/QuickOSM/>

Manuales de diseño y construcción de infraestructuras verdes

- Centro de Estudios y Promoción para el Habitar. (2010). Filtros biológicos para la remoción de nutrientes de aguas grises. PNUD Nicaragua. <https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/Biofiltros-Domiciliares.pdf>
- EPA. (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Humedales de flujo subsuperficial. EPA 832-F-00-023. United States Environmental Protection Agency. Office of Water Washington, D.C.
- GIZ. (2011). Revisión Técnica de Humedales Artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas. Agencia de Cooperación Internacional

- de Alemania. Programa de Saneamiento Sostenible ECOSAN.
<https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/Revision-Tecnica-de-Humedales-Artificiales.pdf>
- Yocum, D. (2006). Manual de Diseño: Humedal construido para el tratamiento de las aguas grises por biofiltración. Universidad De California, 1-16. <https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/Manual-de-Dise-o-para-Biofiltro.pdf>
- Peña Guzmán, Carlos Andrés, & Lara Borrero, Jaime. (2012). TRATAMIENTO DE AGUAS DE ESCORRENTÍA MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES: ESTADO DEL ARTE. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 22(2), 39-61. Retrieved March 01, 2023, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-81702012000200003&lng=en&tlng=es.
- Rivas, Armando. (2011). Curso humedales para el tratamiento de aguas residuales. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA. SEMARNAT.
- Rivas, Armando. (2019). Tratamiento de aguas residuales mediante sistemas naturales (humedales y lagunas artificiales). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA.
- Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., Schertenleib, R., y Zurbrügg, C. (2018). Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento . Dübendorf (Suiza): Instituto Federal Suizo para la Ciencia y la Tecnología Acuática (Eawag), 2da. edición revisada.
- AEP. (2016). Hacia una Ciudad de México sensible al agua. El espacio público como una estrategia de gestión de agua de lluvia. Ciudad de México. Autoridad del Espacio Público: Gobierno de la Ciudad de México.
- Urbanisten. (s.f.). Watersquare Bentemplein, Rotterdam.
<https://www.urbanisten.nl/work/bentemplein>
- Water Sensitive Cities. (2019). Short Courses. IHE Delft Institute for Water Education.
- Abellán, Ana. (2015). “Medidas estructurales”. SuD Sostenible.
<http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/>
- Instituto Municipal de Planeación de León. (2020). Manual para la gestión de la infraestructura verde en la ciudad de León, Guanajuato.
<https://www.implan.gob.mx/pdf/thumb/manual-de-infraestructura-verde.pdf>
- Urbanisten. (s.f.) Sponge Garden, Rotterdam. <https://www.urbanisten.nl/work/sponge-garden-dhkxw>
- IMPLAN Hermosillo. (2019). Manual de lineamientos de diseño de infraestructura verde para municipios mexicanos. https://www.implanhermosillo.gob.mx/wp-content/uploads/2019/06/Manual_IV3.pdf
- Watershed Management Group. (2012). Infraestructura Verde para Comunidades del Desierto Sonorense. <http://www.harvestingrainwater.com/wp-content/uploads/2012/01/Infraestructura-Verde-Para-Comunidades-Del-Desierto-Sonorense.pdf>
- Pima County Regional Flood Control District. (2015). Design Standards for Stormwater Detention and Retention.
https://webcms.pima.gov/UserFiles/Servers/Server_6/File/Government/Flood%20Control/Rules%20and%20Procedures/Stormwater%20Detention-Retention/dssdr-manual-board-version-201511.pdf
- NVSWCD. (2009). Rain Garden Design and Construction: A Northern Virginia. Homeowner's Guide. Virginia: Fairfax County. <https://www.fairfaxcounty.gov/soil-water-conservation/sites/soil-water-conservation/files/assets/documents/raingardenbk.pdf>

San Mateo County. (2009). San Mateo County Sustainable Green Streets and Parking Lots Design Guidebook.

<https://www.flowstobay.org/documents/municipalities/sustainable%20streets/San%20Mateo%20Guidebook.pdf>

Pima County. (2015). Low Impact Development and Green Infrastructure Guidance Manual. Tucson, EE.UU.

https://webcms.pima.gov/UserFiles/Servers/Server_6/File/Government/Flood%20Control/Floodplain%20Management/Low%20Impact%20Development/li-gi-manual-20150311.pdf

CONAFOR. (s.f.). Manual de conservación de suelos. Obras para el control de erosión en cárcavas.

<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/20/1311Manual%20de%20Conservacion%20de%20Suelos%20.pdf>

CONAFOR. (2018). Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas.

<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/20/1310Manual%20de%20Conservacion%20de%20Suelos%20.pdf>