

# Instituto de Ecología y Cambio Climático

## CUADERNO DE INVESTIGACIÓN

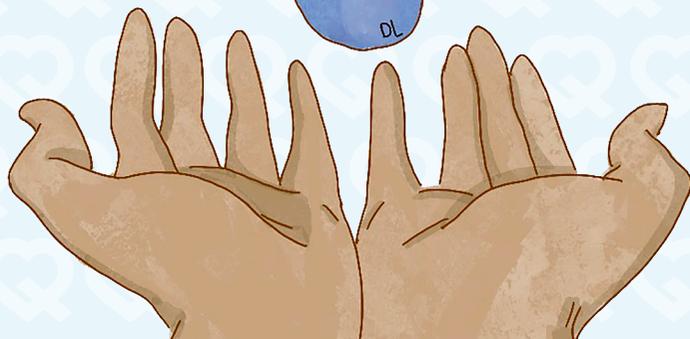
NÚMERO 6 / Agosto 2024

**Gobernanza para recuperar las cuencas**

**Visualización del Jardín Botánico CICATA Querétaro mediante realidad virtual**

**Ciudades Protegidas: una iniciativa para recuperar la biodiversidad**

**Mapeo digital de la conductividad hidráulica del suelo en el Parque Recreativo Joya-La Barreta**





**Título:** Cuaderno de Investigación No. 6

**Año:** 2024

**Corrección de estilo:** Rocío Río de la Loza Quinzaños

**Diseño editorial:** Mariana Suzette Escobar Ruvalcaba

**Portada:** Mariana Suzette Escobar Ruvalcaba  
y Lic. Daniela Alejandra Leal Villalvazo

© 2024 Instituto de Ecología y Cambio  
Climático del Municipio de Querétaro

Bld. Bernardo Quintana 10000  
Col. Centro Sur C.P. 76090  
Santiago de Querétaro, Querétaro, México

# DIRECTORIO

**Mtro. Luis Bernardo Nava Guerrero**

Alcalde del Municipio de Querétaro

**Lic. Alejandro Sterling Sánchez**

Secretario de Desarrollo Sostenible  
Municipio de Querétaro

**Mtro. Alejandro Angulo Carrera**

Director del Instituto de Ecología y Cambio Climático  
Municipio de Querétaro

**Mtro. Francisco Javier García Meléndez**

Coordinador de Investigación Ambiental del Instituto de Ecología  
y Cambio Climático

# ÍNDICE

**6**

***Presentación***

**10**

***Artículos de investigación:***

Gobernanza para recuperar las cuencas

**18**

Visualización del Jardín Botánico CICATA Querétaro mediante realidad virtual

**26**

Ciudades Protegidas: una iniciativa para recuperar la biodiversidad

**30**

Mapeo digital de la conductividad hidráulica del suelo en el Parque Recreativo Joya-La Barreta



# > PRESENTACIÓN

Presentación del *Cuaderno de Investigación No. 6*  
del Instituto de Ecología y Cambio Climático del  
Municipio de Querétaro



**E**l Municipio de Querétaro, a través del Instituto de Ecología y Cambio Climático (IECC), promueve, protege, respeta y garantiza el Derecho Humano a la Ciencia; por ello, como parte de las acciones de investigación y difusión se promueve la generación y divulgación del conocimiento científico y las políticas científicas en la materia ambiental, para inducir la corresponsabilidad, la cogestión, la actualización del marco regulatorio y la protección del derecho humano a un medio ambiente sano.

En este sentido, presentamos el *Cuaderno de Investigación No. 6*, con la finalidad de contribuir al conocimiento de nuestro entorno municipal y sentar las bases para futuras políticas públicas ambientales que contribuyan a la conservación y protección de la biodiversidad, la sostenibilidad y una mejor calidad de vida en términos ambientales.

**En esta edición presentamos un artículo sobre la gobernanza para recuperar las cuencas, un tema de gran relevancia, sobre todo, en un contexto de extrema sequía.** La recuperación del Río Querétaro será un proceso complejo que demanda la colaboración continua de actores diversos y cambiantes. La gobernanza para este fin debe enfocarse no solo en establecer alianzas sólidas y permanentes entre todos los sectores involucrados, sino también en asegurar que ninguna contribución ni responsabilidad sea invisibilizada a lo largo del tiempo.

**Después, hablamos sobre la visualización del Jardín Botánico de CICATA Querétaro mediante realidad virtual.** El artículo describe el proyecto «Jardines Botánicos», que desarrolló una aplicación móvil para explorar una colección de 50 especies vegetales. Presenta imágenes reales, modelado 3D e información científica, con el objetivo de fomentar la educación ambiental y la conservación de la biodiversidad, especialmente de la flora semidesértica de Querétaro.

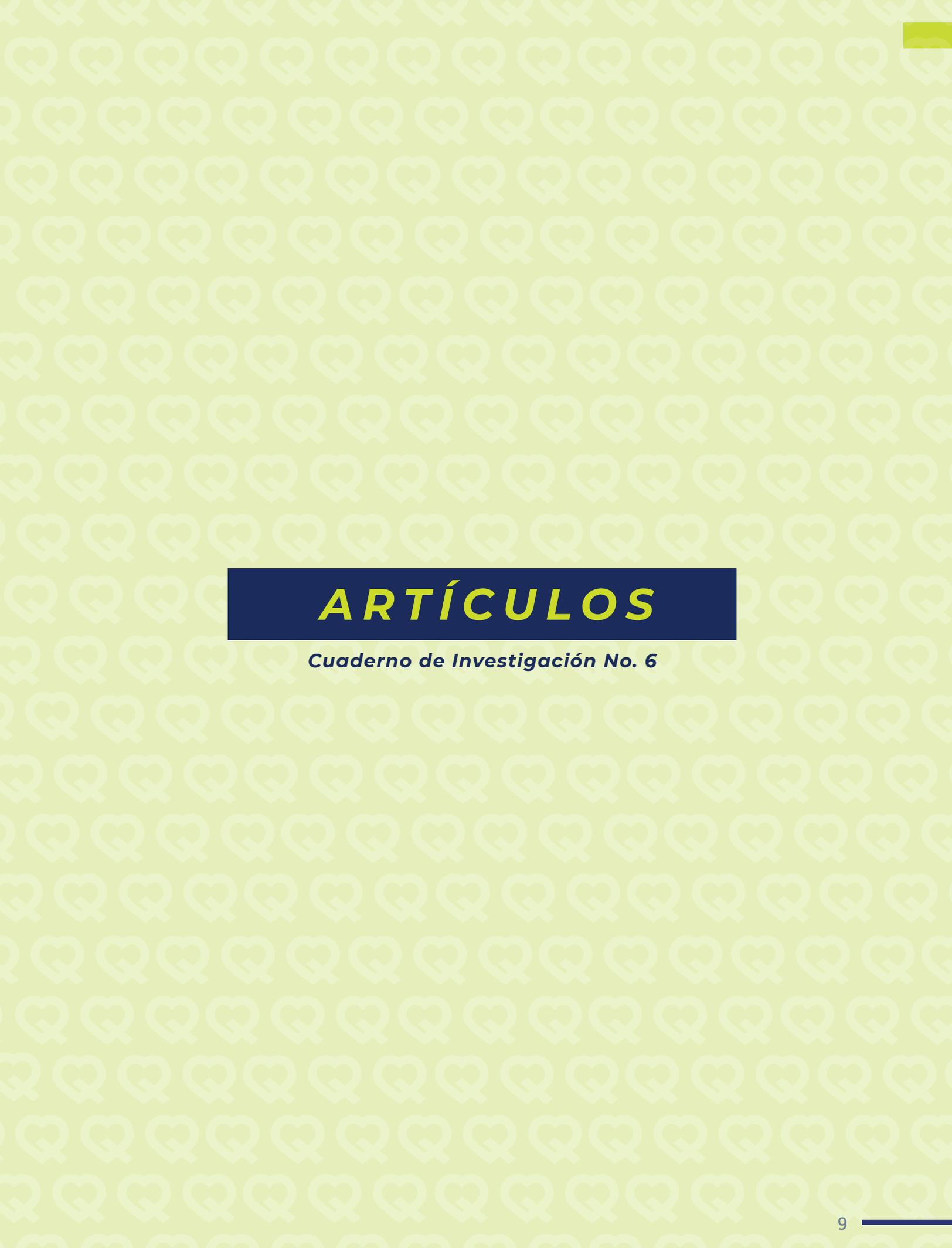
**Por otra parte, damos a conocer la propuesta de «Ciudades Protegidas», una iniciativa socioambiental creada para abordar propuestas ciudadanas con el fin de restaurar la biodiversidad en la colonia Villas de Santiago de la delegación Epigmenio González.**

**Finalmente, presentamos los resultados de un estudio sobre la conductividad hidráulica del suelo en el Parque Recreativo Joya-La Barreta.** Se trata de un mapeo que permite hacer predicciones similares en otros sitios del estado de Querétaro.

Con la publicación del *Cuaderno de Investigación No. 6*, el IECC reafirma su compromiso con la investigación, la divulgación científica y la formulación de políticas públicas que protejan nuestro entorno y mejoren la calidad de vida de nuestros ciudadanos.

A través de los diversos artículos presentados, esta publicación resalta la importancia de la innovación y la colaboración en la gestión ambiental, invitando a toda la comunidad a participar activamente en la protección y restauración de nuestra biodiversidad. Esperamos que este cuaderno inspire a todos los actores a involucrarse en estos esfuerzos vitales y a seguir trabajando juntos hacia un futuro más sostenible y resiliente para el municipio de Querétaro.

Agradecemos a todos los investigadores y colaboradores por su invaluable aporte a esta edición y anticipamos las continuas contribuciones de esta publicación al conocimiento y conservación de nuestro medio ambiente.



# **ARTÍCULOS**

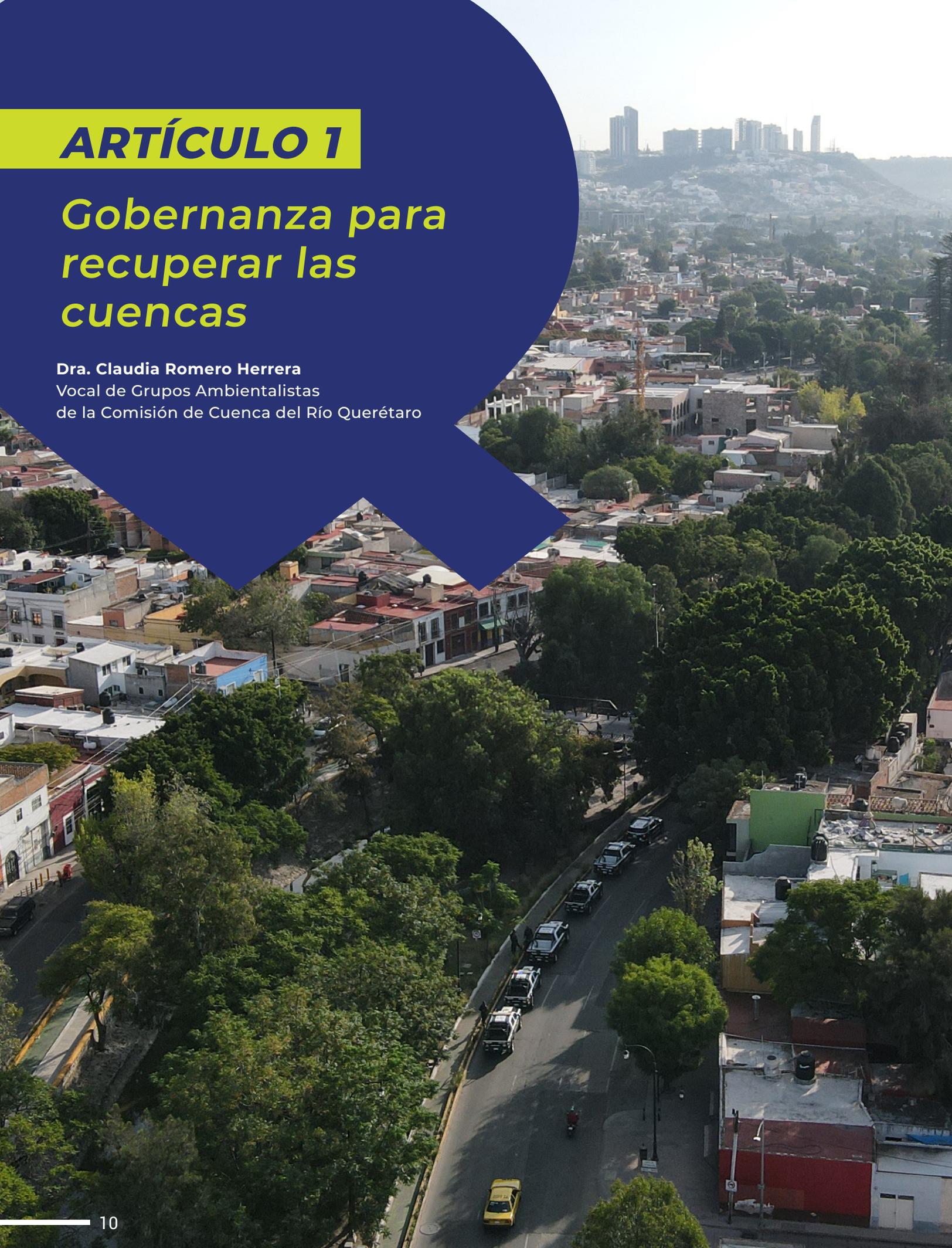
*Cuaderno de Investigación No. 6*

# ARTÍCULO 1

## Gobernanza para recuperar las cuencas

**Dra. Claudia Romero Herrera**

Vocal de Grupos Ambientalistas  
de la Comisión de Cuenca del Río Querétaro



En todos los rincones del mundo las sociedades del siglo XXI están apostando por revertir el error de desecar, desviar y entubar las aguas de sus lagos y ríos. Por un lado, porque la naturaleza no deja de demostrar que éstas siempre vuelven a su cauce natural, como lo prueban las inundaciones en la Ciudad de México, nacida sobre los cinco grandes lagos de Tenochtitlán, o el retorno del río Santa Catarina en Monterrey después del huracán Alex en 2010. Por otro lado, porque va recuperándose la conciencia sobre la interdependencia entre el ser humano y el ecosistema al que pertenece.

En cada contexto, recuperar los cuerpos de agua deteriorados tiene sus propios desafíos. Querétaro tiene la fortuna de que por sus tierras corre un río resiliente, que sigue vivo pese a cargar con más de 300 años de contaminación. Los rastros que vertían desechos de las reses en la acequia principal en 1600 hoy corresponden a las rancharías de zonas ganaderas, los vertederos de obrajes de 1700 se convirtieron en los residuos de las fábricas textiles del siglo XIX y hoy son aguas residuales de los parques industriales, y los desagües del antiguo sistema de aguas siguen siendo drenajes domésticos.

**El acuífero de Querétaro, extendido en 460 kilómetros cuadrados de subsuelo del valle, mantuvo la fertilidad de las tierras queretanas sobre la que dan fe las crónicas coloniales, investigaciones recientes y las múltiples formas de vida que todavía hoy sostiene; mientras que el río, la forma más visible del agua de la cuenca, ha sido proveedor generacional de alimentos, higiene, convivencia, recreación y estética.**

Cuando, en el siglo XVIII la ciudad de Santiago de Querétaro resolvió el dilema de quitar o dejar las fuentes de contaminación que afectaban al Río Blanco (hoy río Querétaro), la sociedad de la época tomó una decisión cuyas

consecuencias habrían de resentirse siglos adelante. Una conducción artificial llevaría aguas limpias a partir de los abundantes manantiales que alimentaban al río cuenca arriba, en el pueblo de La Cañada, y el cauce natural, que hasta entonces alimentaba el sistema de acequias proveedor de agua para el consumo humano y riego de huertas, fue dejado como conducción de aguas sucias (Urquiola, 2013).

Sin querer, la decisión para el abastecimiento inmediato de la ciudad fue determinante para el destino del río. Sin embargo, a pesar de que el río, hoy turbio en su color y fétido en su olor en buena parte de su recorrido dentro de la mancha urbana, durante siglos ha recibido contaminantes, no ha dejado de proveer beneficios ecosistémicos para la ciudad y sus habitantes.



**Figura 1:** Presa de la División de las Aguas construida en 1654 para el reparto de aguas del río, 2019.

## La importancia del Río Querétaro

Una parte importante del estado de deterioro actual de los ríos se explica en que la forma en que los miramos condiciona la forma en la que los tratamos. Hoy en día, hay quienes miran con recelo el que identifican como “canal” de “aguas negras” en donde los rivereños de distintos puntos de la ciudad recuerdan haberse bañado y lavado ropa hace no más de 20 años y donde nadaban patos hace no más de 8. **El proceso de desconexión con los ríos ha hecho cada vez más difícil recordarlos y comprenderlos como lo que son: epicentros de la vida cultural y biológica.**

El Río Querétaro, cuyos 63.6 kilómetros nacientes del cerro El Zamorano cruzan cuatro municipios del estado para desembocar en la cuenca del Río Lerma, fue hasta mediados del siglo XX la principal fuente de agua potable para los habitantes de la capital, además de escenario

de actividades importantes para la vida social, como baños y paseos en lancha. **Como sistema circulatorio de la cuenca, interviene en la regulación de la conectividad hidrológica, del transporte de sedimentos y de la temperatura, además de proporcionar hábitats para la biodiversidad, prevenir inundaciones y determinar el potencial de desarrollo socioeconómico (Pineda, 2019).** Por su valor, tanto social como ecológico, constituye un importante patrimonio biocultural, en cuyo recorrido se entreteje la vida.

En medio de la crisis hídrica global, el dilema de recuperar o dejar perecer los ríos urbanos nos recuerda que, así como el origen de una ciudad está vinculado a sus cuerpos de agua, el destino de éstos es determinante para el de su sociedad.



Figura 2. Río Querétaro a la altura de la Avenida Universidad, 2019.

## Esfuerzos históricos

La expansión urbana e industrial de los últimos sesenta años ha provocado importantes alteraciones en el sistema fluvial, disminuyendo su calidad ambiental y funcionalidad natural.

**A pesar de la progresiva desconexión de la población con el Río Querétaro y su consecuente desvalorización, a lo largo del tiempo algunas proyecciones gubernamentales y propuestas ciudadanas, particularmente de los grupos ambientalistas locales, han denotado interés en su mantenimiento y conservación.**

Por ejemplo, el Plan Parcial para la Conservación y Mejoramiento del Río de 1980 y los estudios e intervenciones alrededor de 2011. Más recientemente, la preocupación sobre los riesgos a la salud por la presencia de microorganismos infecciosos y contaminantes emergentes en el caudal, la preocupación por las consecuencias del cambio climático y la toma de conciencia, en particular de las juventudes, sobre la importancia de la salud ecológica para la salud humana han detonado voluntades para su recuperación.

En 2019, la capital del estado fue escenario de distintas acciones ciudadanas en favor de los ríos urbanos. De este a oeste, en el Río Querétaro colectivos organizaron limpiezas y acciones culturales de concientización. Se conformó un Consejo Ciudadano del Agua. Habitantes aledaños al arroyo Jurica, al noreste de la ciudad, comenzaron también jornadas semanales de limpieza. Las acciones ciudadanas que hicieron visibles más de 30 toneladas de residuos sólidos atrajeron la atención pública, reavivando el debate sobre el estado y destino de los ríos.

Algo importante sucedió en diciembre de 2021: el **«Modelo de saneamiento de aguas residuales fuera de la red de drenaje»** fue seleccionado de entre distintas propuestas de saneamiento presentadas dentro del Grupo Especializado de Saneamiento de la Comisión



**Figura 3:** Presa de la División de las Aguas construida en 1654 para el reparto de aguas del río, 2019.

Cuenca del Río Querétaro, a partir de la reactivación de esta última a principios del mismo año. La propuesta, hoy conocida como **«Proyecto de Saneamiento Alternativo del Río Querétaro Fuera de la Red de Drenaje»** sustentada en soluciones basadas en la naturaleza que replican el protocolo biotecnológico previamente utilizado para el Pueblito, se divide en etapas que integran 20 tramos a lo largo de tres afluentes de la cuenca del Río Querétaro, empezando por un tramo de 3.5 kilómetros. Si bien, para la rehabilitación integral es necesario un proceso a largo plazo, que contemple recuperación de ecosistemas, prevención para la eliminación de descargas de agua contaminada y reforestaciones estratégicas, el actual proyecto promete, como punto de partida, devolver al agua contaminada las condiciones que permitan su reutilización y eliminar el riesgo a la salud humana.

Con la inversión inicial de 5.1 millones de pesos, aportados por la Comisión Estatal de Aguas, en noviembre de 2023 inició la etapa de ejecución con la instalación de estructuras retardadoras de flujo de agua y la introducción del complejo enzimático entre La Cañada y la colonia Calesa, para rehabilitar las funciones del río que naturalmente reducen patógenos, parásitos, materia orgánica y bacterias.

No es el primer ni único intento de saneamiento del Río Querétaro. Sin embargo, podría ser el primero que presente resultados de continuidad, apropiación social y evidencia de mejora en la calidad del agua. Para ello se requiere gobernanza.

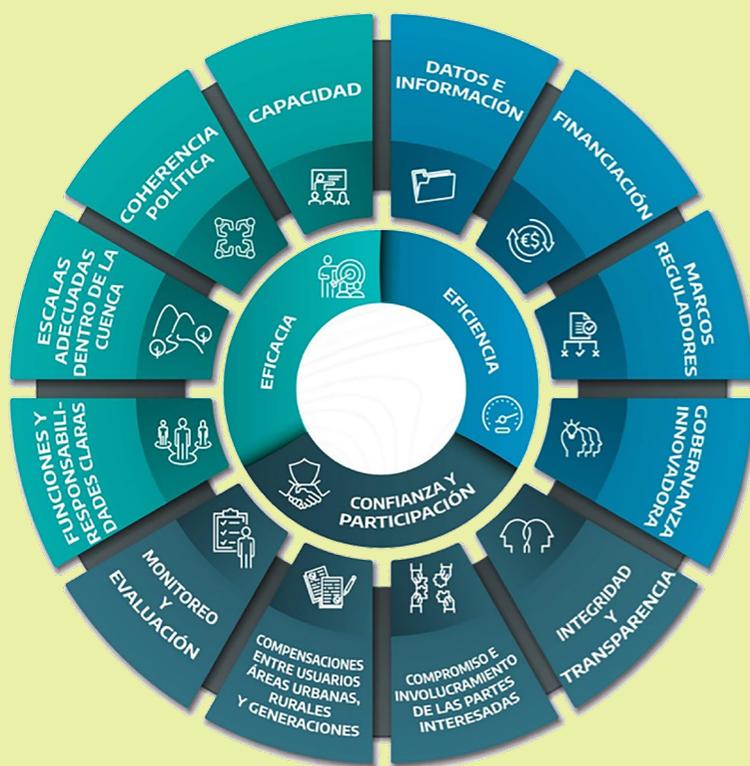
## El reto de la gobernanza

En las sociedades democráticas contemporáneas, manejar sustentablemente los impactos humanos en la naturaleza requiere de acuerdos que consideren y concilien necesidades e intereses de todos los sectores, asegurando el bienestar para la vida humana y no humana. Modelos contemporáneos de manejo del agua, como la Gestión Integrada de Cuencas Hidrológicas, proponen que estos acuerdos emanen de la gobernanza.

La gobernanza entendida, dentro de una forma de gobernar que favorece las interacciones Estado-sociedad, como la corresponsabilidad civil de la acción gubernamental; sin embargo, ha sido criticada por la experiencia empírica de Estados que no logran aún alejarse del modelo centralizado con participación restringida a través de reglas que permiten acceso únicamente a aquellos actores que cuenten con mejor posición político-económica o cierto tipo de información técnica (Pacheco, 2008). Por otro lado, el Programa Nacional Hídrico 2020-2024 enuncia las deficiencias institucionales que en la práctica obstaculizan la consecución del objetivo estratégico 5 orientado a “mejorar las condiciones para una gobernanza del agua que fortalezca la toma de decisiones y permita

la transformación de la gestión para proteger los derechos humanos”. Entre ellas, refiere la falta de representatividad social y de coordinación interinstitucional, los problemas relativos a la difusión de información, la corrupción y las limitaciones operativo-presupuestales para la continuidad de la ejecución (PNH, 2020).

Estos serían, según la teoría y la norma, los retos para, como lo enuncia el Plan, **“construir un marco de colaboración para la toma de decisiones que aseguren la participación efectiva de la ciudadanía en un marco de inclusión y corresponsabilidad”** así como **“promover la participación social en la planeación democrática, la vigilancia y el monitoreo de la política hídrica.”**



**Figura 4.** Capacidades para la gobernanza, según la OCDE  
Fuente: GIZ Procuencia, 2021.

El actual proyecto de saneamiento para el Río Querétaro cumple con interesantes prerrequisitos para la gobernanza. Por un lado, el no ser un esfuerzo de generación espontánea, unilateral, ni que atañe a una sola voluntad, sino una convergencia entre la movilización social de los últimos años, la gestión académica, la urgencia que impone la situación hídrica actual y la voluntad política. Por otro lado, haber sido aprobado para su implementación en la Comisión de Cuenca del Río Querétaro, un organismo auxiliar del Consejo de Cuenca Lerma-Chapala integrado por doce vocalías que comprenden instituciones públicas de los tres niveles de gobierno, sectores ciudadanos y usuarios del agua de diferentes sectores, dota al proyecto de bases para la participación. No obstante que actualmente solamente dos de las vocalías ciudadanas cuentan con representatividad operativa, en su diseño la estructura del organismo ya es intersectorial, interinstitucional, intergeneracional e intercultural. La efectividad del modelo de representación dependerá de la instalación progresiva y el funcionamiento permanente de los comités por sector.

Otro aspecto relevante es que **a diferencia de proyectos previos cuyo monitoreo, vigilancia y presentación de resultados estuvo fuera del ojo público, el actual proyecto contempla una estrategia de socialización que ya ha comenzado a acercar el proyecto a distintos sectores a través de sus vocalías ciudadanas y está en proceso de ser ampliada.** Esto favorece el acompañamiento social del proyecto, lo que podría contribuir positivamente a la recuperación de la legitimidad y confianza deterioradas en la última década en todo el país con antecedentes de contaminadores promoviendo agendas verdes, capitalización partidista de políticas ambientales y acciones ciudadanas, así como el aumento de conflictos hídricos.

En 2022 el Centro Regional de Capacitación en Cuencas llevó a cabo una evaluación del índice de gobernanza de la Cuenca del Río Querétaro para orientar la toma de decisiones consensuadas desde su Comisión de Cuenca. Basado en los elementos de instituciones, política, in-



**Figura 5.** Fotografía de la exposición “Los ríos de la ciudad” del Museo del Agua de Querétaro, 2020.

formación, tecnología, financiamiento y cambio climático, el estudio arrojó que, si bien existe representación de distintos sectores en los espacios de participación formal, su influencia efectiva está condicionada a la baja disponibilidad de información, el limitado conocimiento de los actores sobre el funcionamiento de la cuenca y la asimetría entre grupos de interés. El monitoreo local de la implementación del Acuerdo de Escazú en 2023 señaló la importancia de incorporar prácticas de gobernanza a las estructuras formales de participación, para la eliminación de brechas lingüísticas, técnicas, raciales, socioeconómicas, digitales y de información.

Durante 2023, la Comisión de Cuenca del Río Querétaro reactivó y amplió las vocalías ciudadanas, acordó la creación de un sistema de información pública sobre la cuenca, actualmente en construcción, y llevó a cabo la actualización de su manual operativo. Esta última permitió la incorporación de mecanismos y prácticas para el fortalecimiento de la gobernanza ambiental, impulsadas por las vocalías de la sociedad organizada y grupos ambientalistas.

Los aquí enunciados son esfuerzos de un organismo conformado por academia, sociedad y gobierno, para dotar a su operación de condiciones mínimas para la gobernanza.

## Conclusiones

Sabiendo que la recuperación de un río es un proceso de largo aliento que no corresponde a un solo actor ni a un solo tiempo, y que por lo tanto requiere la colaboración sostenida de actores tanto diversos como cambiantes, la gobernanza presenta el reto no solo de generar alianzas virtuosas y permanentes entre todos los sectores, sino de hacerlo sin invisibilizar aportaciones ni responsabilidades.

En el contexto de la historia del Río Querétaro, en donde múltiples esfuerzos previos con alto presupuesto público, no han logrado cambiar el rumbo ni el paradigma, **el actual proyecto de saneamiento, abre al menos dos posibilidades: el riesgo de aumentar el desaliento y desconfianza de muchas generaciones, o bien la oportunidad de sentar bases para la acción integral a largo plazo.**

La gobernanza necesaria para recuperar la cuenca implica, por un lado, conservar las condiciones existentes: organismos multisectoriales, representatividad básica, difusión activa. Fortalecer las capacidades en construcción, como la colaboración horizontal y la rendición de cuentas. Asumir buenas prácticas que siguen organismos de naturaleza similar en otras partes del país, como las sesiones públicas, socializadas mediante actas o transmisión virtual, y el cumplimiento irrestricto de sus lineamientos. Por otro lado, generar las condiciones que faltan, como asegurar el nivel máximo de participación en todas las fases de la política pública: formulación, implementación, monitoreo y evaluación, como de todos los sectores de la sociedad. **También afianzar las capacidades humanas para que la escucha entre actores que en el pasado y presente el Río Querétaro ha hecho converger madure en formas de colaboración.**

La consolidación de un objetivo común entre visiones distintas es quizá uno de los más grandes desafíos para la gobernanza que, cabe recordar, es un proceso de construcción permanente donde los avances y retrocesos se traducen en condiciones para la cooperación, apropiación social y legitimidad. La gobernanza se logra en entornos donde se puede discrepar en algunos puntos de vista y coincidir en otros. Tiene, además, como requisito base la creación de acuerdos confiables, por lo que pierde condiciones de prosperar en la opacidad, la exclusión, la verticalidad, la discrecionalidad y la denostación de opiniones por motivos de identidad étnica, de género, etaria u otros. En sentido inverso, aumentan sus condiciones en las prácticas de integridad, inclusión, deliberación y transparencia.

Finalmente, **la creación de intereses en común exige trascender el interés particular, incluidos el interés de conservar modos de vida y de producción que proveen comodidad a costa de la salud ecológica que es al final de cuentas la salud humana.** Como nos lo recuerda el actual Relator de las Naciones Unidas por el derecho humano al agua, Pedro Arrojo, sanar la cuenca no es una tarea técnico-mecánica, sino la mucho más fina y compleja labor de devolver el equilibrio a la relación con el agua y hacer las paces con nuestros ríos.

## Bibliografía

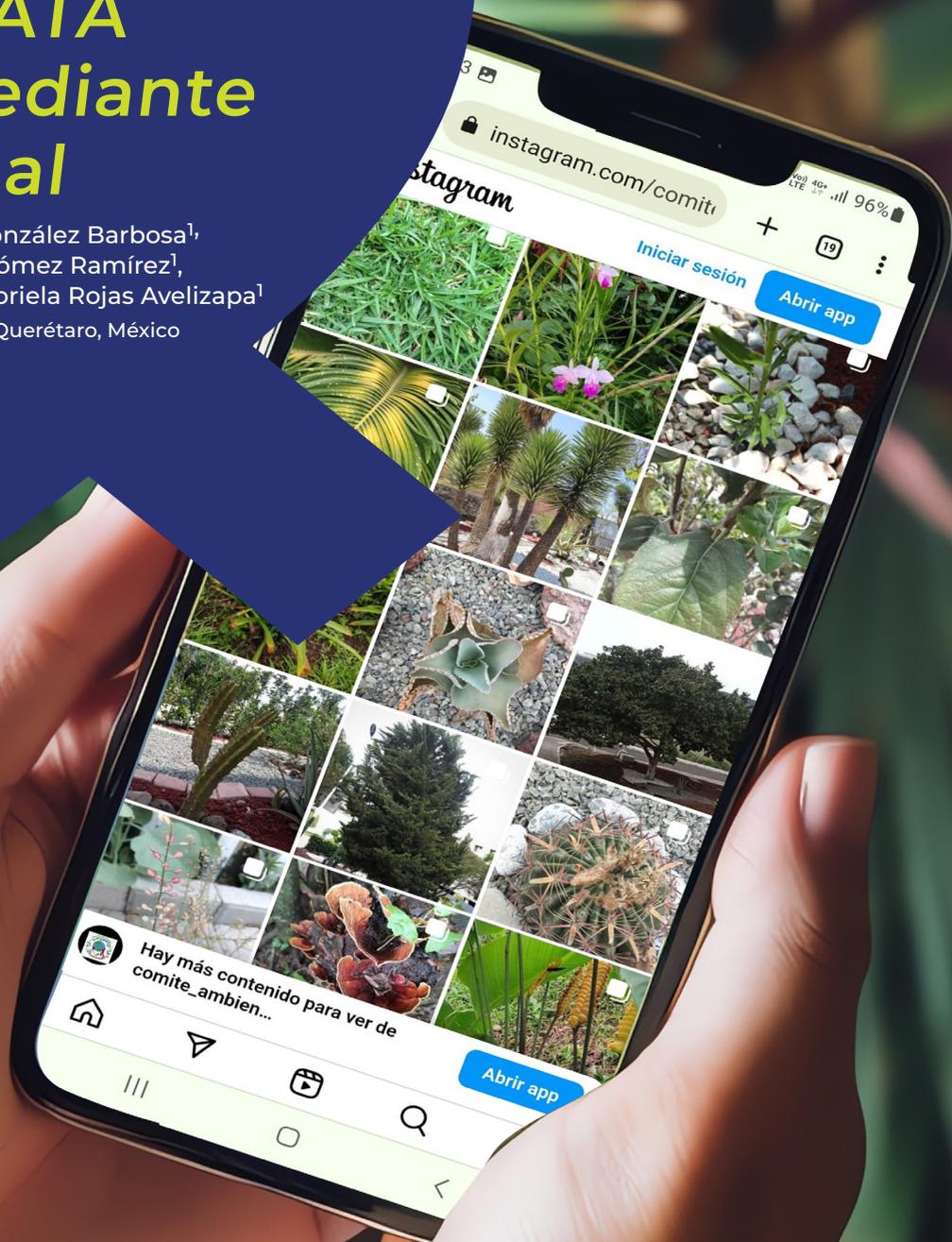
- CONAGUA (2020). *Programa Nacional Hídrico 2020-2024*. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5609188&fecha=30/12/2020#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5609188&fecha=30/12/2020#gsc.tab=0)
- Pacheco-Vega, R. y Vega, O. (2008). *Los debates sobre la gobernanza del agua: hacia una agenda de investigación en México*.
- Pineda, R. (2019). *Los ríos de la ciudad: la importancia de los servicios ecosistémicos*.
- Vega, M., Daniela, Chao Sosa, M. D., Soria Rivera, T. V., Navarro, J., Rico Gallegos, J., Correa Rodríguez, F., Curiel López, G. M., Balvin Velásquez, S. M. y Vázquez Xicoténcatl, N. (2023). *Informe especial: Monitoreo local del Acuerdo de Escazú para la garantía del derecho al agua en Querétaro*. Agua.org.mx. <https://agua.org.mx/biblioteca/informe-especial-monitoreo-local-del-acuerdo-de-escazu-para-la-garantia-del-derecho-al-agua-en-queretaro-bajo-tierra/>
- Urquiola, I. (2013). *Aguas sucias... aguas limpias: el acueducto de Querétaro*. Municipio de Querétaro. [https://sic.cultura.gob.mx/ficha.php?table=fondo\\_editorial&table\\_id=6242](https://sic.cultura.gob.mx/ficha.php?table=fondo_editorial&table_id=6242)

## ARTÍCULO 2

# Visualización del Jardín Botánico CICATA Querétaro mediante realidad virtual

Juan José Rodríguez Peña<sup>1</sup>, José Joel González Barbosa<sup>1</sup>,  
Antonio Hernández Zavala<sup>1</sup>, Marlene Gómez Ramírez<sup>1</sup>,  
Ana Isabel Sanchis Castillo<sup>1</sup> y Norma Gabriela Rojas Avelizapa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Politécnico Nacional CICATA Unidad Querétaro, México



## Resumen

¿Es posible hacer conciencia ecológica del patrimonio naturalista *ex situ* de un jardín botánico, ante los efectos del cambio climático con el uso de una aplicación móvil con realidad virtual en ecosistemas urbanos? Este artículo, describe el proyecto «Jardines Botánicos» que tuvo como objetivo el desarrollo de una aplicación móvil con escenarios de realidad virtual que albergan una colección de la taxonomía de 50 especies con imágenes reales, escenarios virtuales que incluye el modelado de imágenes en 3D e información científica relevante. Propiciando el encuentro entre los visitantes y la comunidad en general, con el fin de contribuir a la conservación de la biodiversidad, la formación ambiental para la sustentabilidad, la conservación y el cuidado del medio ambiente; especialmente de la flora semidesértica de Querétaro.

## Introducción

El Jardín Botánico de CICATA Querétaro, cuenta con una variedad de especies de la flora semidesértica local y será el punto de encuentro que contribuya a la formación ambiental para la sustentabilidad y los beneficios que estas áreas verdes aportan. Despertará el interés de las nuevas generaciones en la conservación y cuidado del medio ambiente.

Ante la alarmante situación que se vive por la disminución de especies vegetales, los jardines botánicos en áreas urbanas tienen actualmente una función muy importante para educar, promover y desarrollar conciencia y capacidades ecológicas que involucren al público y al personal del jardín (Blackmore, Gibby y Rae, 2011). **Los jardines botánicos desempeñan un papel central en la conservación de especies de plantas *ex situ*, así como en la conservación de la diversidad global de especies (Mounce, Smith y Brockington, 2017).**



Según investigadores (Keith, Ferrer-Paris, Nicholson y Kingsford, 2020), los diferentes factores que configuran las ciudades actuales impactan en el territorio en el que se ubican. Las regiones urbanas se diferencian claramente de otros ecosistemas, no solo por la tecnología que las ocupa, sino también por el predominio de los humanos. Factores como el tráfico de vehículos, la contaminación del aire y la expansión urbana interactúan con la topografía local, la infraestructura de transporte, los patrones de movilidad y las preferencias sociales para crear un paisaje único compartido por especies animales, vegetales y humanas.

Por ello, nos planteamos el objetivo de desarrollar una aplicación móvil con realidad virtual del patrimonio naturalista del Jardín Botánico de CICATA Querétaro. Para resolver el problema planteado de hacer más accesible la biodiversidad de especies a los visitantes, al vivir una experiencia educativa inmersiva, con cercanía con la naturaleza mediante



la utilización y visualización de datos que proporcione la aplicación móvil con realidad virtual y así fomentar la conservación de la diversidad global de especies.

Recientemente, se señala que hay varias aplicaciones móviles que exploran tecnologías de realidad aumentada para apoyar y enriquecer la experiencia de los visitantes a jardines botánicos (Postolache et al., 2022). Tal es el caso del Jardín Botánico Tropical de la Universidad de Lisboa en Portugal, que está especializado en la flora tropical y semitropical con 600 especies. Su principal aportación fue proponer un conjunto de complementos para este tipo de aplicaciones, organizándolos en cuatro categorías: a saber de los objetivos, los contenidos y la organización de las formas de presentación de estos, las tecnologías emergentes y otros requisitos no funcionales.

Hoy en día, muchos jardines botánicos, museos y parques públicos ofrecen aplicaciones móviles a sus visitantes —que incluyen información

detallada sobre el jardín, visitas temáticas guiadas, mapas, rutas, experiencia multimedia y de realidad aumentada—, permitiendo a los visitantes una experiencia más flexible y atractiva del lugar. Tal es el caso de las aplicaciones de los jardines botánicos Kew Gardens, Jobim Botanic y el Royal Botanical Garden Sydney.

De acuerdo con expertos en sistemas de navegación y realidad aumentada (Pavlova, Bashta, Kravchuk, Hnatchuk y El Bouhissi, 2022), hoy en día los estudiantes se preocupan por la digitalización y la sustentabilidad de sus campus universitarios; como el caso de la Universidad Nacional Khmelnytsky en Ucrania, en donde desarrollan proyectos de tecnología verde y quieren ver su universidad moderna y tecnológica. Han creado un sistema de información en forma de aplicación móvil, que proporciona asistencia en la ruta en tiempo real y reproducción de las rutas guardadas mediante la tecnología de realidad aumentada. A través del uso de la cámara y del teléfono celular, se puede planear y visualizar la ruta que se seguirá dentro de las instalaciones de la universidad. Se utilizaron tecnologías como el sistema operativo iOS, lenguaje de programación Swift y la biblioteca de realidad aumentada ARKit.

### **La propuesta de Harrington y colaboradores (Harrington, Bledsoe, Miller y Pring, 2021) se centra en el aprendizaje del mundo natural mediante el uso de un motor de juegos.**

Esta propuesta permite a los usuarios visualizar la realidad a través de un paseo en un bosque virtual, de una manera similar a como lo experimentarían con tecnologías de realidad aumentada (AR) o realidad virtual (VR) en un Holodeck, para ver el pabellón, explorar los pequeños detalles de una flor, explorar todo lo que te encuentres, salirte del sendero para tomar otro o abrir la guía virtual del jardín. Para la creación de grandes modelos geoespaciales, inmersivos y fotorealistas a una escala real, se utilizaron paisajes que pudieran reflejar con

precisión paisajes del mundo real, visualización de datos en 3D de las plantas, terrenos, entornos ecológicos y cascadas de agua. Logrando así fusionar información de múltiples fuentes para crear un entorno de alta fidelidad de la naturaleza.

Otro interesante estudio (Peng, Yu, Shen y Pi, 2021), refiere la distribución de un jardín paisajístico que se basa en gráficos 3D y realidad virtual. Es un modelo complejo en 3D, en donde se utiliza un sistema de reconocimiento de imágenes y escenarios en 3D que coinciden con la colección de fotografías y paisajes en tiempo real. Este proyecto piloto se encuentra en Turín, Italia y utilizó el Sistema de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) para el patrimonio cultural, combinándolo con el análisis de imágenes en un complejo circuito integrado digital programable FPGA y herramientas GIS.

Finalmente, **Bettelli, y otros (2020) presentaron en su artículo «Usando la realidad virtual se enriquece la visita de un jardín botánico» una propuesta que inspiró nuestro proyecto.** Los autores mencionan que hoy en día la realidad virtual es ampliamente utilizada en la industria del turismo, mejorando las experiencias en varios sitios del patrimonio cultural. Sin embargo, se ha presentado poco interés a los sitios naturalistas. Su proyecto «Esto es (no) sólo un árbol» significó que los visitantes tuvieran una mayor accesibilidad al patrimonio cultural y naturalista, al descubrir el ecosistema de un árbol a través del uso de controladores HTC Vive y de un escenario virtual, simulando un contenido educativo para el usuario final. Utilizaron Blender 2.79 y Unity 2017.3.1.fl, un micrófono Neumann KU 100 que permitió ingresar sonidos de la arboleda y ruidos ambientales.

## Metodología

Para la realización del proyecto se dividieron las actividades en dos grupos de trabajo, los que participaron en la caracterización de las especies del patrimonio naturalista y los que desarrollaron la aplicación móvil con realidad virtual y el modelado 3D.

### **Caracterización de especies de la flora**

Se utilizó la aplicación de código abierto iNaturalist, con reconocimiento de patrones de imágenes y aprendizaje profundo, para identificar el género y familia de cada planta. La información proporcionada por la aplicación fue obtenida por un usuario registrado en un dispositivo móvil. En este caso el usuario es el Comité Ambiental de CICATA Querétaro. Las observaciones realizadas dentro de CICATA Querétaro contribuyen al conocimiento de la biodiversidad en la ciudad de Querétaro sin discriminar la importancia o estado de conservación de la planta. Se han incluido todas las especies observadas para dar una imagen más clara de las interacciones del ecosistema en este lugar. Gracias a la aplicación iNaturalist se pueden compartir observaciones con repositorios de datos científicos alrededor del mundo, lo que genera reciprocidad con la comunidad científica y nos ayuda a crear redes de conservación de especies en la región semidesértica de Querétaro (California Academy of Sciences and National Geographic, s.f.).

La colección de fotografías que se obtuvieron del Jardín Botánico de CICATA Querétaro se ingresaron a una cuenta en la red social de Instagram de Meta, con la información detallada de cada una de las especies, para incorporarlas en el apartado de “Más información” (ver Figura 1b) y presionando el botón de “Ir” (ver Figura 2c) de la aplicación móvil.

## Desarrollo de la aplicación móvil «Jardines Botánicos»

Para la construcción de las imágenes en 3D se utilizó el programa Blender 3.6 y se hospedaron en GitHub. Además de utilizar una base de datos que alojó los datos de cada una de las especies y que sirvió para la visualización de: nombre de la planta, nombre científico, descripción de la planta y taxonomía (ver Figura 1b,c). El desarrollo de la aplicación móvil fue en PowerApps de Microsoft®, ya que cuenta con funcionalidad de realidad virtual integrada. Una vez instalada en un teléfono celular, se puede ver el “Menú de inicio” (ver Figura 1a).

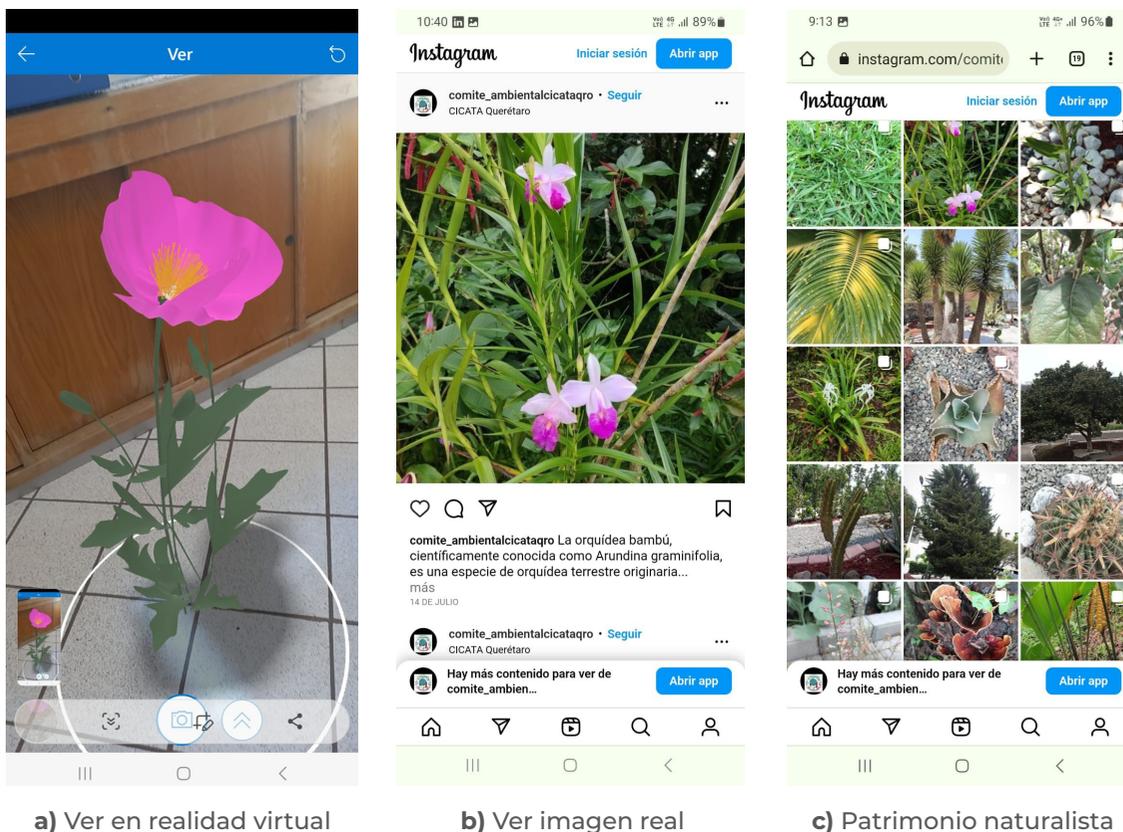


Figura 1. Aplicación móvil para la visualización de datos.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez presionado el botón de “Inicio”, se presenta la pantalla (ver Figura 1b) para elegir la planta que se desea conocer y de esa manera se visualizan los datos de esta (ver Figura 1c).

Se presentan dos botones más, que permiten “Ver en Realidad Virtual” e “Ir”. Al presionar este primero, se ve en realidad virtual la planta previamente seleccionada (ver Figura 2a). Con el segundo botón, se hace un hipervínculo con la cuenta del Comité Ambiental del CICATA Querétaro y se muestra la colección de especies que forman parte del patrimonio naturalista (ver Figura 2b,c) en Instagram.



**Figura 1.** Aplicación móvil con realidad virtual y patrimonio naturalista.

**Fuente:** Elaboración propia.

Esta aplicación móvil con realidad virtual acompañará al visitante durante su recorrido por el Jardín Botánico CICATA Querétaro al convivir con la naturaleza viva y disfrutar la experiencia educativa inmersiva para la formación ambiental, conservación, cuidado y sustentabilidad del patrimonio naturalista.

## Resultados y discusión

Se logró el desarrollo de una primera versión de la aplicación móvil para la visualización del Jardín Botánico CICATA Querétaro con realidad virtual, que acompañará a los visitantes en su recorrido por el patrimonio naturalista y con la cercanía de la naturaleza. El diseño fue orientado al usuario o visitante, por lo que, a través de su teléfono celular, conocerá cada una de las especies, información sobresaliente, una representación de la imagen en 3D; de tal manera que contará con las herramientas

para vivir una experiencia educativa para su formación ambiental y promover la conservación, cuidado y sustentabilidad de su medio ambiente y la naturaleza. Una vez que se tenga un número considerable de visitantes, se identificarán y analizarán los resultados a través de un “cuestionario de satisfacción del visitante” que muestre las adaptaciones y mejoras para incorporarlas posteriormente como actualizaciones.

## Conclusión

Esta innovación tecnológica educativa se suma a otras similares, que cuentan las universidades del mundo y que hacen de esta una importante herramienta para la comunidad local y foránea que visite el Jardín Botánico CICATA Querétaro. La aplicación permite visualizar información sobresaliente de la especie consultada, su representación en realidad virtual; así como obtener más información de la colección del patrimonio naturalista local y de la región. Siendo muy importante su contribución para el encuentro de las generaciones actuales y futuras en la formación ambiental para la sustentabilidad, la conservación y el cuidado del medio ambiente; especialmente de la flora semidesértica de Querétaro.

## Agradecimientos

Este proyecto fue apoyado por la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional con la Clave SIP 20231970. También queremos agradecer a Alejandra Robles Mora y Andrea Bazaldua Sánchez que colaboraron en la caracterización del patrimonio naturalista y el modelado 3D.

## Referencias

- Bettelli, A., Buson, R., Orso, V., Benvegnú, G., Pluchino, P. y Gamberini, L. (2020). Using Virtual Reality to Enrich the Visit at the Botanical Garden. *Annual Review of CyberTherapy and Telemedicine*, 58-61.
- Blackmore, S., Gibby, M. y Rae, D. (2011). Strengthening the scientific contribution of Botanic Gardens to the second phase of the Global Strategy for Plant Conservation. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 166(3), 267-281.
- California Academy of Sciences and National Geographic. (s.f.). *CalTech and CornellTech*. Obtenido de <https://www.inaturalist.org>
- Harrington, M. C., Bledsoe, Z., Miller, J. y Pring, T. (2021). Designing a Virtual Arboretum as an Immersive, Multimodal, Interactive, Data Visualization Virtual Field Trip. *Multimodal Technol. Interact*, 5(18), 1-25. doi:<https://doi.org/10.3390/mti5040018>
- Keith, D. A., Ferrer-Paris, J. R., Nicholson, E. y Kingsford, R. T. (2020). *The IUCN Global Ecosystem Typology 2.0: Descriptive profiles for biomes and ecosystem functional groups*. Gland, Switzerland: IUCN.
- Mounce, R., Smith, P. y Brockington, S. (2017). Ex situ conservation of plant diversity in the world's botanic gardens. *Nature Plants*(3), 795-802.
- Pavlova, O., Bashta, A., Kravchuk, S., Hnatchuk, Y. y El Bouhissi, H. (2022). Augmented Reality Based Technology and Scenarios For Route Planning and Visualization. *3d International Workshop on Intelligent Information Technologies and Systems of Information Security* (págs. 1-11). Khmelnytskyi, Ukraine: CEUR Workshop Proceedings.
- Peng, L., Yu, L., Shen, H. y Pi, J. (2021). 3D Garden landscape planning visualization system based on FPGA processor and virtual reality. *Microprocessors and Microsystems*, 1-5.
- Postolache, S., Torres, R., Afonso, A. P., Carmo, M. B., Cláudio, A. P., Domingos, D., Ferreira, A., Barata, R., Carvalho, P., Coelho, A. G., Duarte, M. C., Garcia, C., Leal, A. I. y Redweik, P. (2022). Contributions to the design of mobile applications for visitors of Botanical Gardens. *Procedia Computer Science*, 196, 389-399.



## **ARTÍCULO 3**

# **Ciudades Protegidas: una iniciativa para recuperar la biodiversidad**

Ing. Paul Rodrigo Benítez Del Razo

## Introducción

«Ciudades Protegidas» es una iniciativa socio-medio ambiental que nace a raíz de problemáticas y propuestas ciudadanas con el objetivo de recuperar la biodiversidad en nuestra comunidad ubicada en el Distrito IV, colonia Villas de Santiago, delegación Epigmenio González, misma que combate los retos de políticas públicas que han afectado al municipio de Querétaro en materia de biodiversidad y medio ambiente.

Como sabemos tenemos un reto muy grande: “la carrera contra el cambio climático”; que, a través de los años, se ha visto con mayor aumento en nuestra zona demográfica con efectos como el aumento de la temperatura, la falta de agua potable, las lluvias torrenciales más potentes y el daño a la población como en salud y patrimonio. Por lo que, a través de los ciudadanos, sociedad civil organizada y gobierno, pusimos en marcha un proyecto ambiental que buscará sumar esfuerzos para contribuir en la conservación de nuestra biodiversidad del municipio, promover la restauración de ecosistemas de biodiversidad, fomentar la economía circular, contribuir a la descarbonización para nuestro estado y que a futuro —con la réplica— pueda sumarse a los esfuerzos para combatir el cambio climático en el mundo.

Como dato importante, según el Censo de Población y Vivienda 2020, **la población asciende a 2,368,467 habitantes en la entidad, aunado a que el estado de Querétaro es uno de los de mayor dinamismo en México y su crecimiento económico es superior a la media nacional**, esto llevará de la mano un indicador de mayor generación de contaminantes, generación de residuos, CO<sub>2</sub>, entre diversos factores que pueden crear un impacto ambiental negativo para la biodiversidad.

## Trayectoria

Todo este proyecto nace a inicios de septiembre del 2022, donde se detectaba la poca cultura y educación ambiental en nuestra comunidad con temas de biodiversidad y medio ambiente. Por lo que, a través de un taller ambiental en la colonia, donde participaron adultos y niños, además de la **donación de 100 árboles nativos de Querétaro como el huizache y el mezquite** —esto con el objetivo de que la gente los pudiera plantar, cuidar y regar frente a sus domicilios—, fue como se empezó a generar el sentido de pertenencia de la biodiversidad con los vecinos de la zona.

A su vez, sabíamos que teníamos que seguir preparándonos en materia de medio ambiente para lograr ser un buen ejemplo para la población, sabíamos de antemano que no era el simple hecho de donar árboles, sino que realmente entendieran que la biodiversidad en nuestro municipio es muy basta y compleja, que entre todos podemos aportar mucho para conservarla.

Analizando nuestra comunidad, detectamos que también existía un alto margen de diversos tipos de contaminación en nuestras calles, casas y predios. Por lo que pusimos en marcha un plan para recuperar nuestros espacios públicos, concientizar a la población sobre los residuos, el reciclaje de materiales de alto valor, el ruido, la captación de agua y los mecanismos para reportar fugas de agua potable, ya que este recurso es muy valioso y escaso, era importante generar ese sentido de pertenencia a los ciudadanos con su entorno.

En la ejecución de dicho plan, empezamos con diferentes fechas para el tema de residuos, se realizaron Jornadas de Tilicheo para invitar a la población a participar y sacar todos los residuos contaminantes que tuvieran en sus domicilios.

**En total fueron 4 jornadas, con una participación aproximada de 2,000 personas y se juntaron alrededor de 40 toneladas de residuos** que fueron trasladadas a los tiraderos municipales.



Después se tuvieron diversas reuniones y mesas de trabajo; por ejemplo, se pudo generar una reunión el día 23 de junio del 2023 con Servicios Públicos Municipales del Municipio de Querétaro y diversas autoridades para generar estrategias que pudieran ayudar y aportar para temas como el reciclaje de materiales de alto valor y la limpieza de espacios públicos, así como invitar a la ciudadanía a mantener las calles limpias, entre otros temas.

Recibimos la invitación a una entrevista en el programa Mundo Verde, del Lic. Alejandro Angulo Carrera, para platicar acerca de cómo los ciudadanos podemos ayudar a mejorar nuestra biodiversidad en nuestro municipio. También fue posible participar en la Actualización del Plan de Desarrollo Urbano 2023 del Municipio de Querétaro, con el fin de hacer aportaciones en materia de biodiversidad que pudiera ayudar a mejorar este rubro en nuestro municipio a futuro.

A su vez, se generaron diversas participaciones con el gobierno estatal a través de nuestra asistencia al Taller de ONU Hábitat 2023 con el objetivo de las ODS. De igual manera, estuvimos presentes en las mesas de trabajo de Participación Ciudadana de Gobierno del Estado en las temáticas de Medio Ambiente, Energía y Desarrollo Urbano Sostenible. Como también

podimos tener participación en el Fórum México Carbón 2023, donde los temas de los Bonos de Carbono y la descarbonización son esenciales para garantizar la biodiversidad en nuestro municipio y en el estado.

Y, la última aportación —más importante para nosotros— fue que pudimos estar presentes y participar en la generación del Plan Agenda 2050 Querétaro en temas medioambientales, buscando concientizar y generar relevancia para la biodiversidad de las futuras generaciones.

## Ecosistemas de biodiversidad

Finalmente, **el clímax de todas estas propuestas y participaciones (además del nombre del proyecto «Ciudades Protegidas») fue justamente la recuperación, restauración, protección y conservación de un espacio público abandonado** —el cual era usado como un punto de tiradero de residuos y que contaba con las características necesarias para convertirse en un espacio de biodiversidad—, mismo que incluía especies nativas del estado de Querétaro (como mezquite, huizache y garambullo, entre otras) de más de 50 años de vida. Dicho espacio está ubicado

en la colonia Jardines de Santiago, delegación Epigmenio González con el nombre «Las Palapas». Se trata de un terreno de 5,000 metros con 143 especies nativas de Querétaro, el cual fue certificado el día 23 de mayo del 2023 por la Universidad Politécnica de Santa Rosa con el Folio 001, a través de nuestra petición ciudadana al Municipio de Querétaro, en el programa Fragmentos de Biodiversidad.

A su vez, el ITQ Campus Norte a través de la presidenta de la Fundación México Orgullo y Tradición, la Lic. María Teresa Gómez Saldaña, replicó y se sumó a este proyecto, logrando certificar un espacio de tamaño considerable en la escuela antes mencionada.

Quiero mencionar que uno de los mayores impactos sociales que generó esta iniciativa fue lograr la participación de los más pequeños y de la comunidad en general, convirtiéndose en un elemento de participación ciudadana latente y constante, donde a través de su esfuerzo, dedicación y disciplina podrán dejar un gran legado a generaciones futuras en materia de biodiversidad.

Buscaremos seguir recuperando y reforestando espacios que cuenten con las características necesarias y tengan un suelo adecuado por ciclos en temporadas de lluvia para aprovechar este recurso escaso. **Nuestro objetivo es cumplir con los objetivos de la ONU (ODS) en su máximo esplendor, encontrar todos los elementos a nuestro alcance sobre cómo podemos ayudar a conservar nuestra biodiversidad en Querétaro,** y que otros ciudadanos, organizaciones civiles, empresas, gobiernos y escuelas busquen replicar esta iniciativa en las zonas donde viven, para que juntos podamos tener un Querétaro más limpio, más sano y con mayor biodiversidad.



## **ARTÍCULO 4**

# **Mapeo digital de la conductividad hidráulica del suelo en el Parque Recreativo Joya-La Barreta, Querétaro, México**

Leonel Mejía<sup>1</sup>, Viviana Marcela Varón Ramírez<sup>2</sup>,  
Mariano Torres-Gómez<sup>2</sup> y Mario Guevara<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

<sup>2</sup> Instituto de Geociencias, UNAM campus Juriquilla.

\*mguevara@geociencias.unam.mx

## Resumen

La conductividad hidráulica del suelo (la capacidad de la matriz del suelo para que el agua fluya a través de sí en condiciones cercanas a saturación o insaturadas) es una variable clave para describir el proceso de infiltración de agua en el suelo. El objetivo es analizar la correlación ambiental de la conductividad hidráulica insaturada medida en campo con infiltrómetros de disco, con covariables ambientales derivadas de la percepción remota o el análisis digital de terreno.

Fueron cuantificados datos de conductividad hidráulica de campo en 6 sitios distribuidos en coberturas de encino, pastizales y matorrales del Parque Recreativo Joya-La Barreta en el estado de Querétaro, México. Los datos de conductividad hidráulica fueron modelados usando como predictores las covariables ambientales.

El resultado del modelo es un mapa digital de conductividad hidráulica en toda el área de interés, escalable a áreas geográficas de gran tamaño. El modelo presenta una varianza explicada que varía de 0.46 a 80%, lo cual sugiere que es posible modelar la conductividad hidráulica empleando un enfoque de mapeo digital de suelos. Pero los resultados obtenidos son conservadores con otros valores reportados en estudios previos (por ejemplo, valores promedio entre 2 y 15 mm/hr, sobre suelos poco desarrollados y pedregosos), quizá porque dependen de un bajo número muestral y más datos se necesitan para describir detalladamente la compleja variabilidad espacial de la conductividad hidráulica dentro de las coberturas analizadas. El flujo de trabajo presentado permite hacer predicciones en otros sitios (como el municipio de Querétaro) con características ambientales similares a las del lugar de estudio (Parque Recreativo Joya-La Barreta).



## Introducción

La conductividad hidráulica del suelo ( $K$ ) describe la tasa de movimiento de agua en condiciones cercanas a saturación (Amoozegar y Warrick, 1986). La  $K$  permite comprender diferentes procesos de movimiento de agua en el suelo; como, por ejemplo, la tasa de infiltración y el movimiento de los nutrientes; por lo que la  $K$  es una propiedad fundamental en el estudio de las relaciones agua-suelo-planta (Castiglión et al., 2018). Además, la  $K$  es una propiedad que permite modelar diferentes procesos hidrológicos, geomorfológicos y climáticos en los que el suelo participa activamente. Por ejemplo, en estudios hidrológicos y agronómicos, la  $K$  facilita el cálculo de la proporción de la precipitación o el agua de riego que se infiltra en el suelo y que genera escorrentía (Vereecken et al., 2010). En condiciones de saturación, una mayor  $K$  implica una mayor capacidad de infiltración (Bigelow et al., 2004), lo que significa que el agua puede moverse rápidamente en el sue-



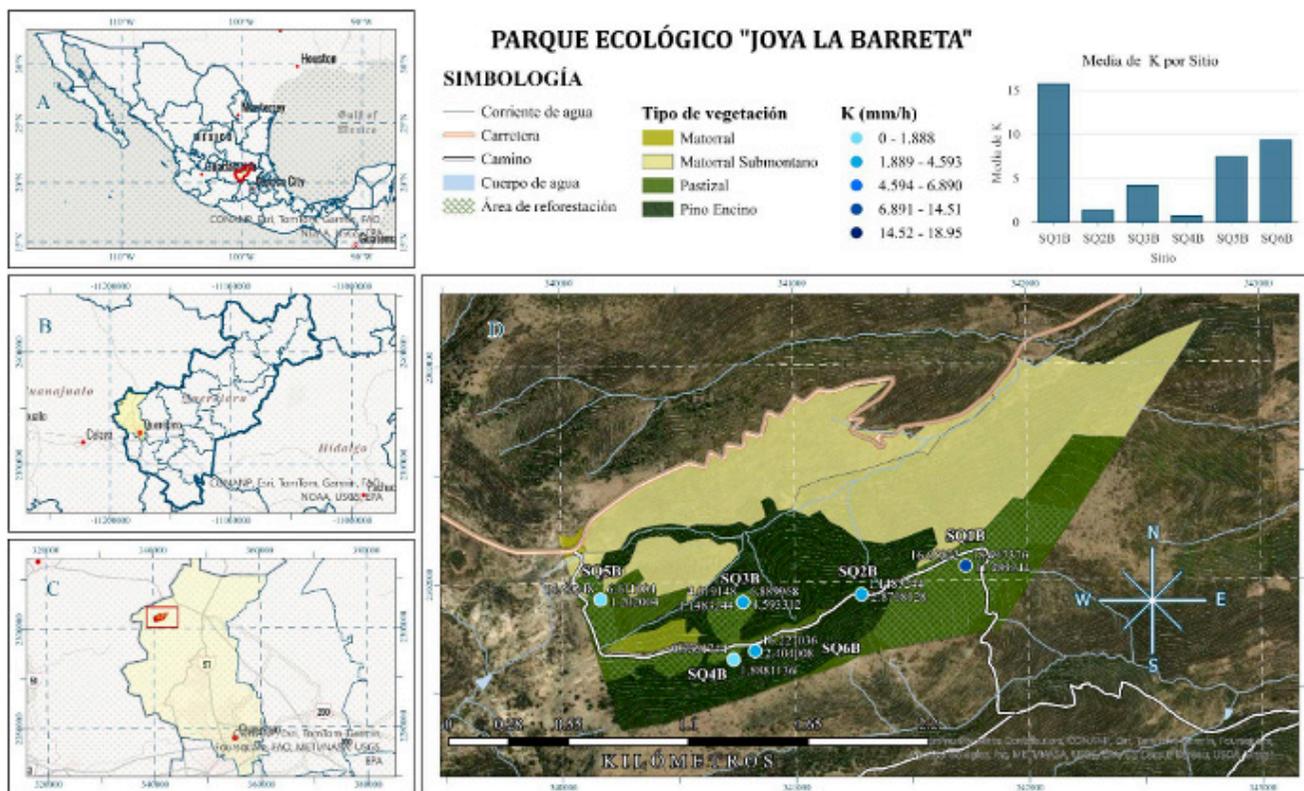
lo y alcanzar capas más profundas. Por el contrario, una menor  $K$  indica una infiltración más lenta, lo que puede resultar en la acumulación de agua en la superficie del suelo y el riesgo de inundaciones.

Existen varios métodos para medir  $K$ , cada uno con sus propias ventajas y limitaciones. Uno de los métodos más comunes es el uso de infiltrómetros, dispositivos diseñados para aplicar agua al suelo y medir la velocidad a la que se infiltra (Yolcubal et al., 2004). Los infiltrómetros pueden ser de varios tipos, como anillos simples, dobles o de disco. Otro método común es el uso de lisímetros, dispositivos que miden la cantidad de agua que se infiltra en el suelo y se mueve hacia capas más profundas (Hanumantha Rao et al., 2009). Además, los métodos de laboratorio, como el uso de columnas de suelo y la aplicación de presión controlada, también se utilizan para medir la  $K$  en condiciones controladas (Reynolds et al., 2000).

$K$  es una medida fundamental para entender y describir el proceso de infiltración de agua en el suelo, y su medición precisa es esencial para una gestión eficaz del agua y del suelo en una variedad de contextos ambientales y agrícolas. El gran problema es que  $K$  depende de a) cada factor que modifique el espacio poroso del suelo y b) de la cantidad y calidad del agua que llueve, escurre o se irriga (Centeno et al., 2022). Por lo anterior,  $K$  tiene una variabilidad espacial muy compleja a distancias cortas (Usovics y Lipiec, 2021).

Para estudiar la variabilidad espacial del suelo, el mapeo digital de suelos es una disciplina emergente en las Ciencias de la Tierra. **El mapeo digital de suelos es una rama de la Ciencia del Suelo dedicada a generar mapas digitales de propiedades, clases y funciones del suelo a lo largo de múltiples gradientes naturales (Lagacherie, 2008).** Para generar mapas digitales del suelo en esta disciplina se combinan observaciones de variables de suelos (p. ej., pH, textura, conductividad hidráulica, etc.), medidas directamente en campo o en laboratorio, con atributos derivados del análisis digital de terreno, imágenes de percepción remota e información temática relacionada con el ambiente de formación de suelos (McBratney et al., 2003). De esta manera, los datos de suelos se acoplan en el espacio estadístico con los datos relacionados al ambiente de formación de suelos, para poder predecir valores de suelos en sitios no visitados y generar mapas digitales de suelos que muestran la variabilidad continua de las variables de suelos de interés. **Dado que la infiltración de agua en el suelo es compleja a distancias cortas, el mapeo digital de suelos ofrece una oportunidad de investigación relevante para caracterizar esta variable compleja en áreas de gran tamaño, de manera costo-efectiva.**

Con un enfoque de mapeo digital de suelos, en este trabajo exploramos el uso de infiltrómetros de tensión para proveer información rápida sobre K y el proceso de infiltración de agua en el suelo en el Parque Recreativo Joya-La Barreta, Querétaro, México (Fig. 1). **El conocimiento de la conductividad hidráulica en los diversos suelos del parque puede ayudar a delimitar áreas prioritarias de conservación para una mejor gestión de recursos hídricos.** Por tanto, el objetivo principal es desarrollar un flujo de trabajo de bajo costo para el mapeo digital de la conductividad hidráulica, en paisajes del Parque Recreativo Joya-La Barreta, pero reproducible y escalable a otros escenarios productivos del municipio de Querétaro.



**Figura 1.** Macrolocalización del área de estudio (izquierda), puntos de muestreo (3 réplicas por sitio) y polígonos de vegetación dominante en el Parque Recreativo Joya-La Barreta (derecha).

## Metodología

En este trabajo desarrollamos un flujo de trabajo en mapeo digital de suelos para evaluar la conductividad hidráulica del suelo de áreas relevantes para el municipio de Querétaro. Los momentos principales de este flujo de trabajo son: a) definición de sitios representativos de muestreo, b) cuantificación de la conductividad hidráulica saturada del suelo, c) obtención de covariables ambientales que influyen en las características del suelo, y d) mapeo digital de la variable de estudio. Con esta metodología se busca generar un flujo de trabajo reproducible y escalable, que facilita la caracterización espacial de la infiltración de agua en el suelo en grandes áreas geográficas.

## Área de estudio

El Parque Recreativo Joya-La Barreta se localiza en el municipio de Querétaro, en el estado de Querétaro, México, en la región central del país (Fig. 1). Con datos obtenidos en una publicación anterior (Cuaderno de Investigación No. 4, 2023), y según el inventario Municipal Forestal y de Suelos del municipio de Querétaro, se describen aspectos climatológicos, geológicos, edafológicos, hidrológicos, biológicos y sociales donde se encuentra que el clima predominante en el parque es el templado subhúmedo con lluvias en verano, mientras que la temperatura media anual es de 12 a 18 °C. El parque también tiene una época seca a principios y finales del invierno e inicios de primavera, con registros de 8.2 y 7.9 mm respectivamente. Geológicamente se encuentra un basamento de rocas ígneas extrusivas de la era Cenozoica y una formación rocosa compuesta principalmente por calizas y areniscas que contribuye a la singularidad y diversidad biológica del parque, convirtiéndose en un valioso ecosistema para la conservación y recreación.

En el parque, el tipo de suelo predominante es el litosol (97.12%) con una profundidad media de

10 cm, lo que indica también una problemática por procesos erosivos. También hay presencia del tipo de suelo vertisol con una profundidad de 10 a 50 cm, siendo suelos fértiles y debido a su ubicación con poca pendiente, son poco susceptibles a erosión. En cuanto a la hidrografía del parque, se identificaron corrientes de tipo intermitentes, que fluyen desde el límite poniente del parque a mayor altitud hacia la parte baja de la cuenca, donde se incorporan a una corriente intermitente que desemboca en la presa Santa Catarina y llega al valle de Buenavista y el valle de la Solana.

**La vegetación en el parque incluye matorral subtropical, matorral inducido y bosque de encino con pino y se encuentran nueve especies con protección ambiental de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, las cuales son: la salamandra, rana verde, víbora de cascabel, cascabel cola negra, gavilán pechirrufo, gavilán de cooper, aguililla canela, aguililla aura y aguililla cola roja.**

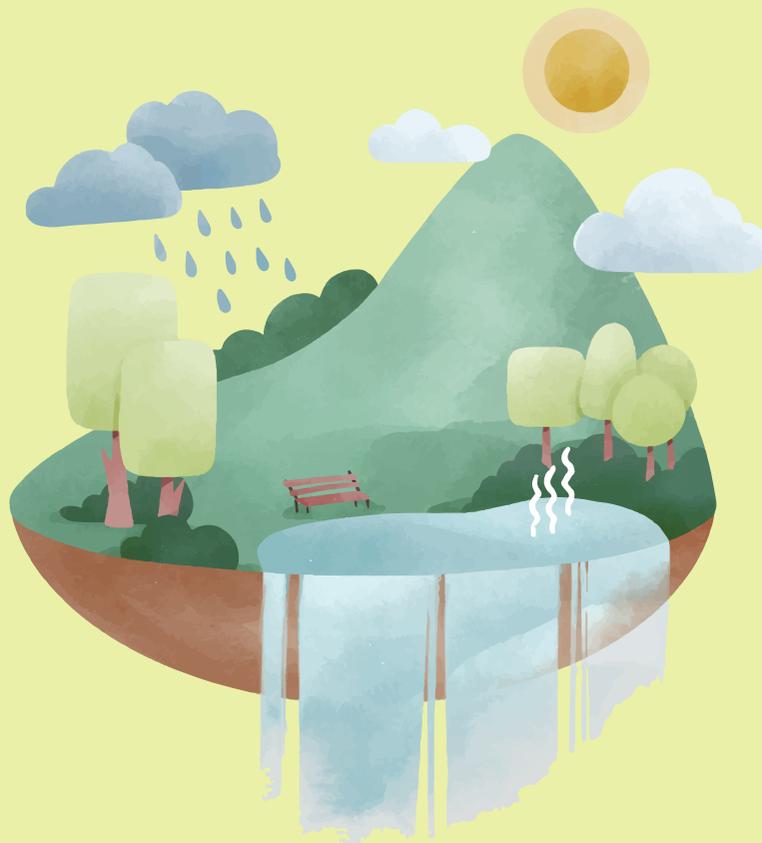
Adicionalmente, el parque brinda servicios ecosistémicos, tales como el mantenimiento de la biodiversidad y de las poblaciones de especies, abastecimiento de plantas medicinales, regulación de la biodiversidad, regulación de erosión, captura de CO<sub>2</sub>, regulación del clima y la mitigación de sequías, servicios culturales y polinización.

## Cuantificación de la conductividad hidráulica saturada del suelo

En este trabajo utilizamos un infiltrómetro de disco y tensión (MDI, METER Group, Inc. Pullman, WA, USA, ver METER, 2024). **El infiltrómetro MDI es una herramienta fundamental para la medición precisa de la tasa de infiltración del suelo en condiciones no saturadas o cercanas a saturación.** Para utilizar este equipo, primero se debe preparar el área de estudio seleccionando un sitio representativo y libre de obstrucciones para la inserción del disco. Luego, se inserta el disco en el suelo utilizando el dispositivo de instalación provisto, asegurándose de que esté correctamente posicionado y sellado para evitar fugas de agua.

A continuación, **se inicia el proceso de aplicación de agua al suelo a una velocidad constante y controlada.** El equipo registra continuamente la cantidad de agua aplicada y la velocidad a la que penetra en el suelo, lo que permite calcular la tasa de infiltración en tiempo real. Los datos recopilados se utilizan posteriormente para analizar  $K$ , evaluar la permeabilidad del suelo y comprender mejor la dinámica hidrológica del área de estudio. Para analizar la capacidad de infiltración de agua en el suelo, es importante definir una tensión en el infiltrómetro con la cual se estima la capacidad de succión del agua del suelo, es importante conocer la capacidad de succión de agua en el suelo a diferentes tensiones para conocer la contribución de los distintos tamaños de poros del suelo en el proceso de infiltración, lo cual resulta en la necesidad de más lecturas (a diferentes tensiones) en cada sitio de interés y de un consecuente mayor tiempo de muestreo.

En este trabajo, fueron muestreados seis sitios representativos de acuerdo con su cobertura vegetal y accesibilidad (Fig. 1) y las lecturas se llevaron a cabo con tres repeticiones. En cada lectura se estima la lámina de infiltración acu-



mulada y se relaciona con parámetros hidráulicos (ejemplo, parámetros de retención de agua de van Genuchten) del suelo, que dependen de las características principales del espacio poroso del suelo en cada sitio medido (ejemplo, clase textural), y con las dimensiones del infiltrómetro usado. Con estas relaciones se calculan las tasas de infiltración de cada sitio. La metodología precisa para estimar  $K$  en condiciones insaturadas útil para comparar la capacidad de infiltración en cada sitio está claramente descrita en METER (2024), donde también se encuentran también disponibles los manuales de operación del infiltrómetro empleado y las hojas de cálculo para la determinación de  $K$ .

## Covariables ambientales que influyen en las características del suelo

Las covariables ambientales son utilizadas en el mapeo digital de suelos como soporte espacial para generar predicciones y mapas continuos de variables de suelo. Estas covariables son variables ambientales que se consideran relevantes para la formación y distribución de los suelos, como el relieve, la vegetación, la geología, la hidrología, el clima, entre otros (Lagacherie, 2008). Al incorporar covariables ambientales en el proceso de modelado, se pueden capturar las relaciones espaciales y ambientales que influyen en la distribución de los suelos, lo que permite obtener mapas más detallados y precisos. Además, las covariables ambientales también pueden ayudar a identificar patrones y tendencias en la distribución de los suelos, así como a entender mejor los procesos pedogenéticos que ocurren en el paisaje (Walter et al., 2006).

En resumen, las covariables ambientales son herramientas clave en el mapeo digital de suelos para mejorar la precisión de los modelos y proporcionar una representación más completa y contextualizada del paisaje. En este trabajo obtenemos un conjunto de covariables ambientales (Tabla 1) que influyen en las características del suelo relacionadas con su conductividad hidráulica. Estas covariables se usan para explorar cómo cambian relaciones estadísticas entre variables a lo largo del paisaje, y para conocer su capacidad predictiva para escalar los datos medidos en los sitios, a toda el área de interés; es decir, desde el Parque Recreativo Joya-La Barreta hasta el municipio entero de Querétaro.

## Mapeo digital de la conductividad hidráulica saturada del suelo

Los mapas predictivos son elaborados mediante aprendizaje asistido por computadora. Esta rama de la estadística está dirigida por datos. Principalmente por la capacidad de nuestras computadoras para almacenar información y buscar exhaustivamente las principales relaciones lineales y no lineales entre variables (por ejemplo, valores de K con covariables ambientales o valores de imágenes derivadas de percepción remota) en el espacio estadístico, para posteriormente modelarlas y predecirlas (Wadoux et al., 2020).

Existen muchas alternativas para modelar y predecir variables de interés. En este trabajo empleamos una herramienta automatizada para modelar y predecir variables de interés basada en ensambles de diversos modelos predictivos con base en árboles de regresión. Esta herramienta está contenida en el paquete “landmap” (Hengl, 2021) implementada en el ambiente de R Project . Para validar esta estrategia usamos validación espacial cruzada. Esto quiere decir que repetimos el modelo muchas veces dejan-

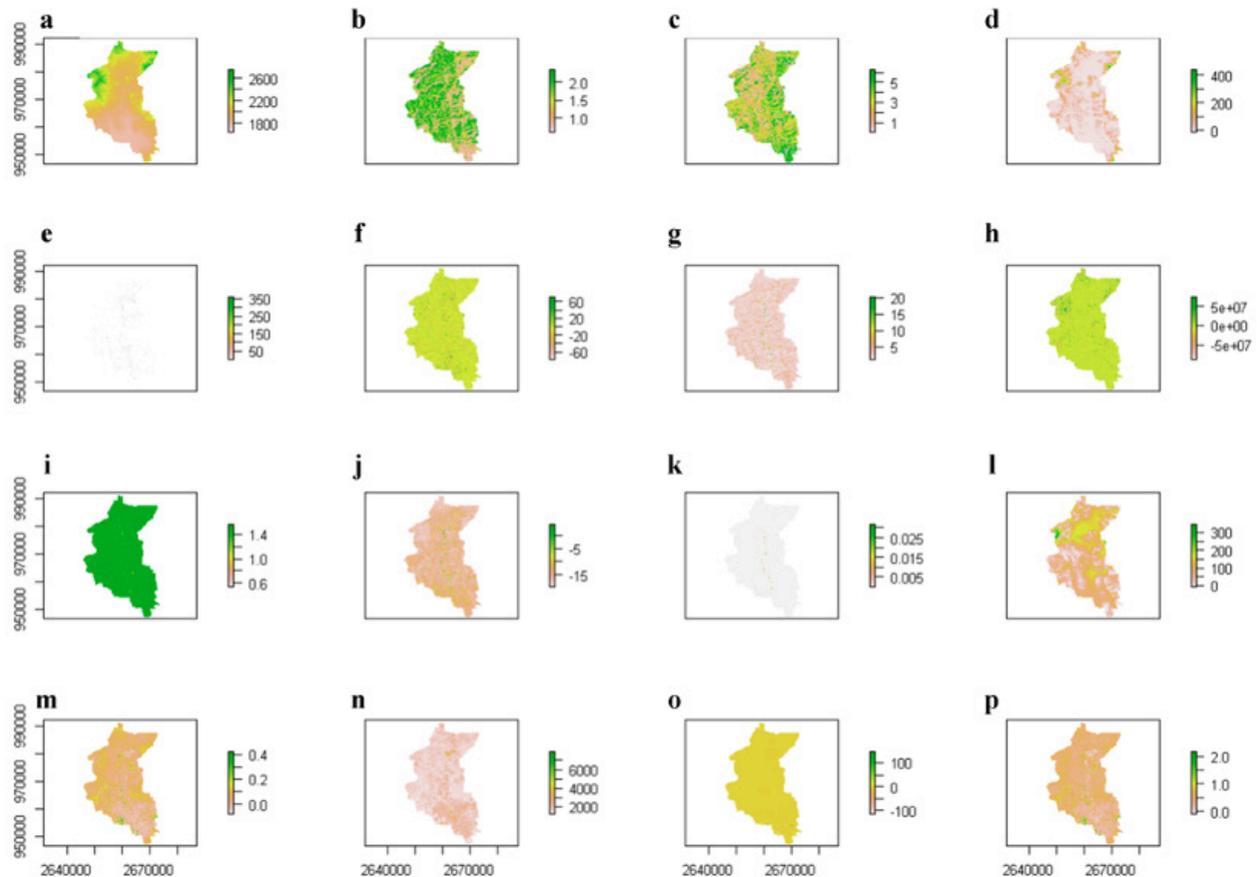
do datos fuera de la construcción del modelo (ejemplo, 10% de datos) con el propósito de validarlos (Refaeilzadeh et al., 2009). Reportamos el error promedio y la varianza explicada ( $r^2$ ).

Estos resultados son luego ingresados a un Sistema de Información Geográfica (SIG) para adaptar la información a un mapa que sea fácil de comprender y que muestre con claridad los resultados. Lo anterior se logra mediante la adición de una escala de color, cuerpo y corrientes de agua, los puntos que fueron determinados para muestreo, simbología y cuadrícula de posicionamiento. Con esto, se pueden elaborar mapas predictivos precisos, que también pueden ser escalados para regiones más amplias. Por ejemplo, se puede realizar este procedimiento para la zona de estudio del Parque Recreativo Joya-La Barreta, y luego proyectar el modelo de predicción al municipio de Querétaro, lo cual, si bien no es exacto, si permite obtener un posible panorama regional de conductividad hidráulica del suelo a esta escala.

**Tabla 1.** Lista de covariables ambientales empleadas en este trabajo como factores de predicción de la conductividad hidráulica saturada del suelo en el Parque Recreativo Joya-La Barreta y su escalamiento a todo el municipio de Querétaro. Una representación espacial de estas variables se presenta en la Figura 2.

ATRIBUTO DE TERRENO	DESCRIPCIÓN
Digital elevation model (DEM)	Elevación sobre el nivel del mar (m.s.n.m.)
Analytical hillshading	Sombreado analítico del terreno
Aspect	Exposición del terreno, indica la dirección de la ladera (radianes o grados)
Channel Network Distance	Distancia de cada pixel a la red de drenaje principal
Convergence Index	Calcula un índice de convergencia/divergencia con respecto al flujo terrestre (Koethe y Lehmeier, 1996)
LS Factor	Cálculo del factor de longitud de pendiente basado en pendiente y área de captación específica (Jürgen Böhner y Selige, 2002)
Plan Curvature	La curvatura del terreno a lo largo del plano horizontal
Slope	Ángulo de pendiente máximo en una celda de cuadrícula determinada (Warner et al., 2021)
Topographic Wetness Index	Diferencia entre la elevación de la celda de la cuadrícula y la elevación media local (Beven y Kirkby, 1979)
Total Catchment Area	Procesamiento para el cálculo de la acumulación hídrica
Valley Depth	La diferencia de elevación de la celda de la cuadrícula debajo de una línea de cresta local interpolada (Conrad et al., 2015)
Atmosphere Resistant Vegetation Index (ARVI)	Índice basado en la vegetación que minimiza los efectos de la dispersión atmosférica debido a aerosoles
Bare Soil Index (BSI)	Índice de suelo desnudo para capturar las variaciones del suelo
Enhanced Vegetation Index (EVI)	Índice de Vegetación Mejorado para cuantificar el verdor de la vegetación
Green Chlorophyll Index (GCI)	Para estimar el contenido de clorofila en las hojas de diversas especies de plantas
Green Leaf Index (GLI)	Para obtener el índice de vegetación a partir de las bandas RGB de color natural

**Tabla 1.** Lista de covariables ambientales.



**Figura 2.** Covariables ambientales empleadas como predictoras del proceso de infiltración de agua en el suelo: **a)** Digital Elevation Model (DEM), **b)** Analytical hillshading, **c)** Aspect, **d)** Channel Network Distance, **e)** Convergence Index, **f)** LS Factor, **g)** Plan Curvature, **h)** Slope, **i)** Topographic Wetness Index, **j)** Total Catchment Area, **k)** Valley Depth, **l)** Atmosphere Resistant Vegetation Index (ARVI), **m)** Bare Soil Index (BSI), **n)** Enhanced Vegetation Index (EVI), **o)** Green Chlorophyll Index (GCI), **p)** Green Leaf Index (GLI).

## Resultados

Los datos obtenidos son exploratorios y muestran una variación de valores de K de cerca de 0 a valores que superan los 18 mm/hr. Sin embargo, valores mucho más altos pueden ser encontrados en sitios particulares, como aquellas áreas forestales con altos niveles de bioturbación, o en áreas donde existen otros tipos de flujo preferencial de agua como grietas o una amplia densidad de raíces cercanas a la superficie. Nuestros resultados permiten comparar sitios, pero no representan las tasas de infiltración absolutas en el área de interés.

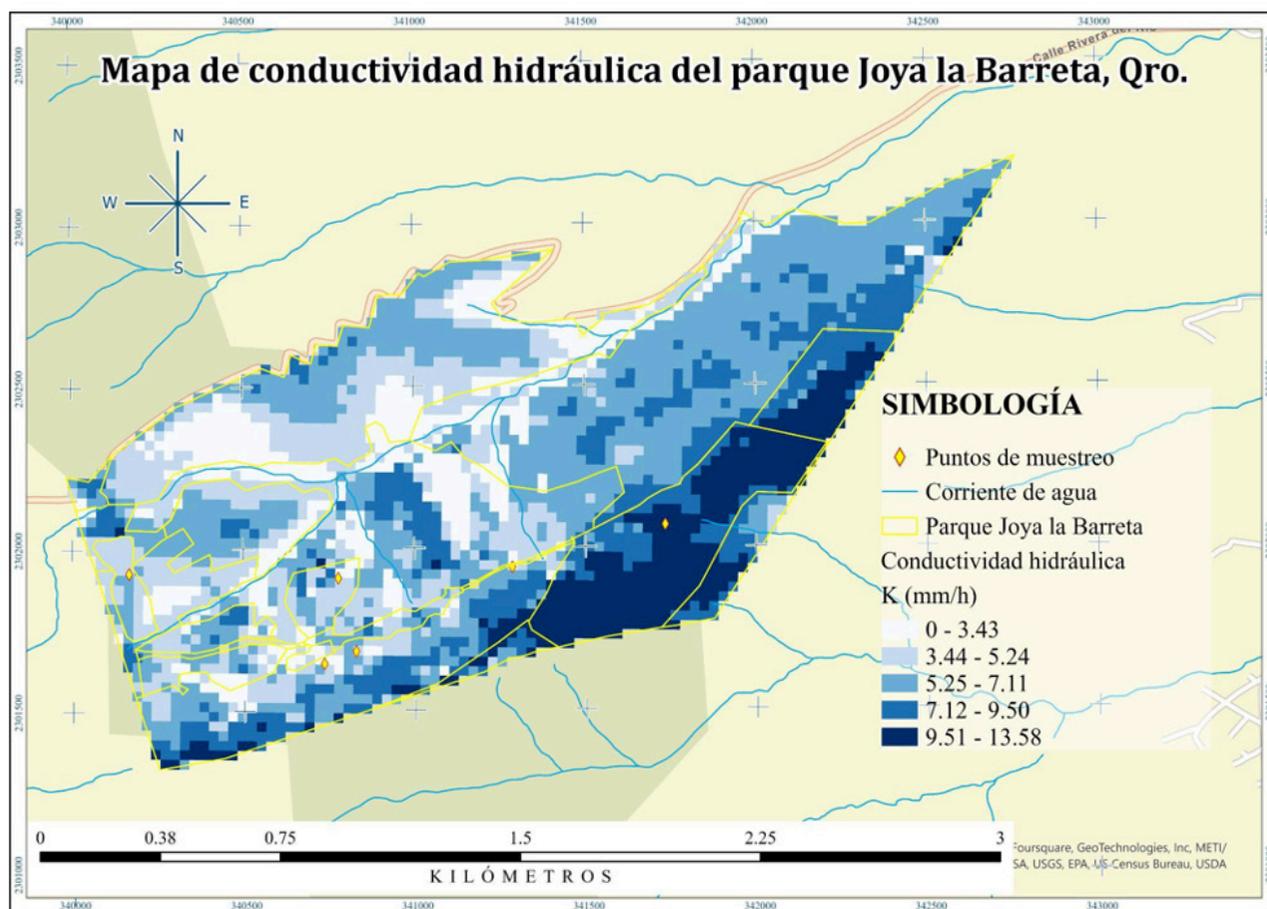
Para este trabajo se realizaron mediciones en distintos tipos de vegetación, lo que permite desarrollar un flujo de trabajo para proyectar los resultados a distintas escalas. **Se observa que existe mayor conductividad hidráulica en las zonas de pastizal dentro del área de reforestación y bajo grado de**

**pendiente, obteniendo una media de  $15.7 \pm 4.419$  mm/h en los cálculos por análisis digital, que son en general valores altos en relación con otros tipos de vegetación del parque (Fig. 3).**

Por otra parte, las mediciones en vegetación de pino-encino son más bajas con una media de  $2.009 \pm 0.86$  mm/h, probablemente porque las zonas muestreadas en estas áreas también ocurren en las pendientes más pronunciadas y en estos ambientes el agua tiende a escurrir por la superficie hasta llegar a una zona de recarga. Sin embargo, más datos son necesarios para representar la variabilidad compleja de la conductividad hidráulica en estos bosques. Otro factor importante es la presencia de caminos forestales con suelos compactados bajo estas coberturas forestales. El número de lecturas de K disponibles para este trabajo es insuficiente para caracterizar detalladamente la variabilidad espacial de la conductividad hidráulica en estos ambientes.

Los datos de K disponibles, aunque escasos, presentan evidencia de correlación con las covariables ambientales adquiridas para este trabajo (Fig. 2) después del proceso de modelación. El coeficiente de determinación es un número entre 0 y 1, donde los valores más cercanos al 1 indican modelos más precisos. En este caso, el modelo predictivo se realizó en 10 ciclos, con un proceso de validación espacial cruzada con el 10% de los datos como referencia para validación, lo cual resultó en un coeficiente de determinación mínimo de 0.4658 y un máximo de 0.7778. Por otra parte, el error estándar residual mide la precisión con la que el modelo de regresión puede predecir valores con nuevos datos, y para este parámetro se obtuvo un valor mínimo de 3.697 mm/h y máximo de 5.733 mm/h.

El modelo elaborado a partir de mapeo digital (Fig. 3) con información de estudios en cam-



**Figura 3.** Mapas predictivos de la conductividad hidráulica de agua en el Parque Recreativo Joya-La Barreta.

po y covariables ambientales presenta valores apegados a los valores reales obtenidos en los puntos de muestreo (Fig. 1). El mapa digital de K provee un posible escenario de variabilidad espacial de este proceso, comparado con los valores obtenidos en campo, limitados a explicar K en un sitio específico (a escala 1 a 1). Las múltiples realizaciones de nuestro modelo predictivo usando aprendizaje por computadora genera una varianza de predicciones máxima del 6% dentro del Parque Recreativo Joya-La Barreta, y este 6% se encuentra en zonas cercanas a casetas o caminos de terracería. Esto indica una relativa estabilidad predictiva (ejemplo, precisión) dentro de las coberturas de interés.

Estudiar la variabilidad espacial de K en el municipio de Querétaro es un proceso tardado y costoso. Gracias al propio desarrollo de funciones ambientales enfocadas al análisis estadístico se puede escalar el método para obtener la conductividad hidráulica para el municipio de Querétaro, utilizando los datos de muestreo, pero elaborando una base de datos de covariables que abarcan el municipio. Para este mapa (Fig. 4) se obtuvo un porcentaje de varianza máximo del 7% en algunas zonas de cultivo y áreas semi pobladas las cuales suman aproximadamente un 15% de la superficie total del municipio.

## Discusión

En este proyecto desarrollamos un flujo de trabajo en mapeo digital de datos de infiltración de agua en los suelos del municipio de Querétaro. Particularmente, en el Parque Recreativo Joya-La Barreta. **Este trabajo pretende reducir el tiempo y el costo requerido para medir directamente en campo la infiltración sobre grandes áreas geográficas. Sin embargo, es importante reconocer la compleja variabilidad espacial de K a distancias cortas**, por lo que más y mejores parámetros relacionados con el proceso de infiltración de agua en el suelo son necesarios para contar con mapas precisos de esta variable, desde la escala de parcela, a la escala municipal.

Presentamos un primer **mapa de la conductividad hidráulica en el parque** analizado y una proyección de la variabilidad potencial en el suelo del municipio de Querétaro. **Nuestros resultados son valiosos porque proveen nueva información sobre variables relevantes para mejor entender el papel de los suelos en el ciclo del agua.** Sin embargo, **no deben considerarse como resultados absolutos, ya que la capacidad de infiltración es un proceso muy complejo que varía a distancias cortas y la cantidad de sitios analizados no necesariamente representa la variabilidad condicional completa del proceso de infiltración, como una función de sus controles ambientales.**

Alternativamente, nuestra metodología se presenta como una ruta de trabajo con un enfoque de mapeo digital de suelos, que puede ser usada para simplificar progresivamente la necesidad de información requerida para caracterizar este complejo proceso en áreas de gran tamaño.

Este trabajo tiene implicaciones sociales y científicas. Primero, porque **el proceso de infiltración de agua en el suelo impacta la disponibilidad de agua para uso humano.**

Conocer el proceso de infiltración es clave en la funcionalidad de los ecosistemas y para desarrollar estrategias eficientes de manejo de agua en territorios productivos.

**El estado de Querétaro, como muchas otras regiones del mundo, presenta claros patrones de intensificación del ciclo del agua y sequías prolongadas recientemente, como el decline en contenidos de humedad de suelo a lo largo del tiempo (Guevara et al., 2021).**

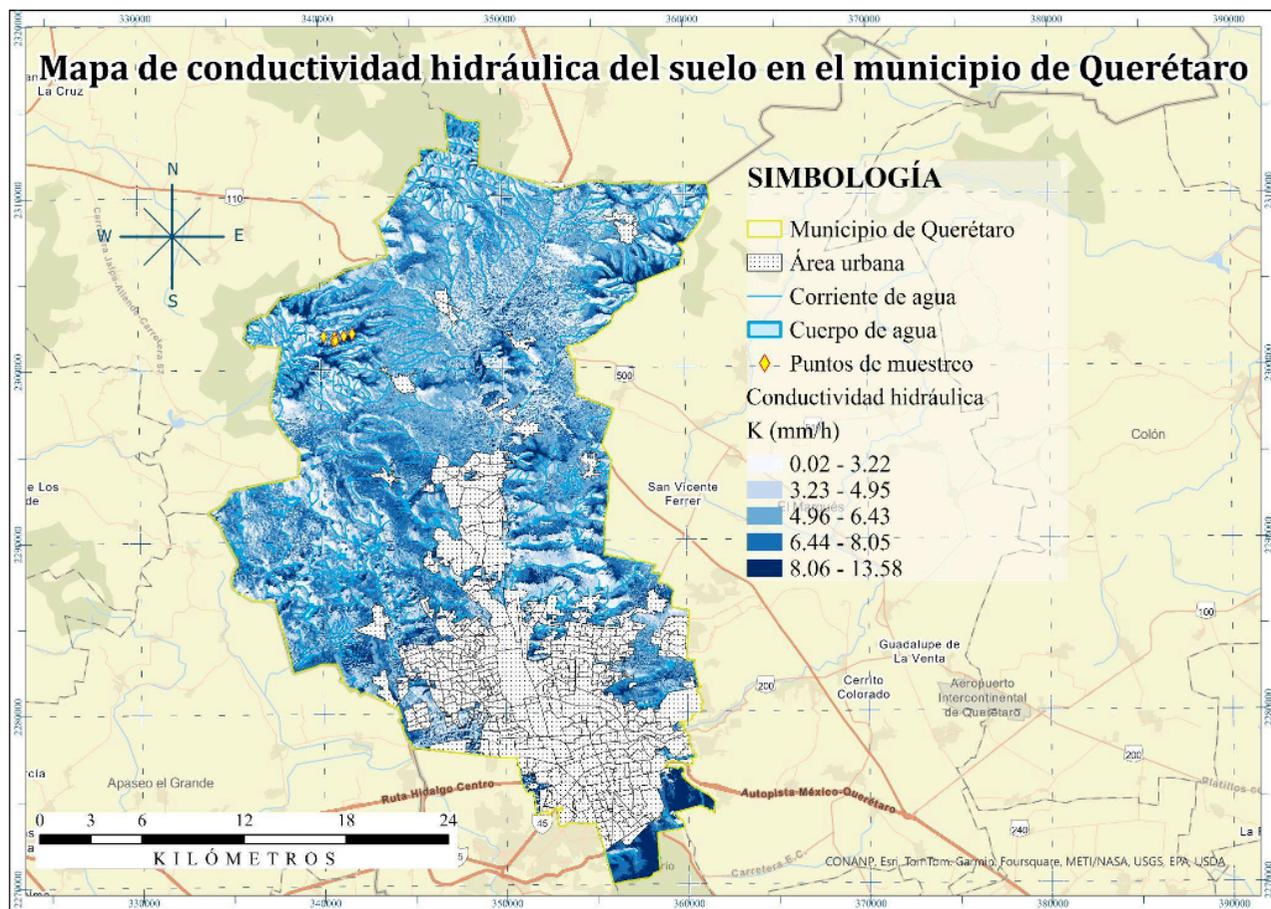
Segundo, porque **no existen datos actualizados sobre la conductividad hidráulica del suelo en grandes áreas geográficas del municipio de Querétaro que son relevantes para la conservación de servicios hidrológicos,** pero también áreas que son vulnerables al acelerado cambio de uso de suelo en el municipio de Querétaro. Por otro lado, la caracterización espacial de la conductividad hidráulica del suelo resulta complicada y costosa ya que se requiere de un gran número de muestras a distancias cortas. Nuestros modelos revelan un patrón de correlación ambiental entre los datos medidos en campo y las covariables ambientales que se usan como factores predictivos de la capacidad de infiltración de agua en el suelo. Los errores de predicción y los coeficientes de determinación son evidencia del patrón de correlación mencionado.

Si bien nuestros resultados dependen de relativamente pocas mediciones del proceso de infiltración, este trabajo provee resultados comparables con resultados previos, pero pocos trabajos reportan valores de infiltración en ambientes cercanos a nuestra área de interés, usando los mismos equipos y aproximación.

En otros ambientes (como en New Franklin, Missouri, a 195 m.s.n.m. en el año 2007), se han

reportado valores de conductividad hidráulica de 46.2 mm/h en sistemas agroforestales y 8.59 mm/h en sistemas de pastoreo rotacional (Kumar et al., 2024). En áreas de pastizal semiárido (al suroeste de Fort Collins, Colorado, en 2002) con suelo desnudo ligeramente pastoreado se obtuvo una K de 7.65 mm/h y en el suelo con vegetación pastoreada se midió una K de 54 mm/h (Fiedler et al., 2002) demostrando un mayor variabilidad de este proceso comparado con nuestros datos disponibles. En las montañas de Irán a 2,360 m.s.n.m. donde predomina el pastizal con un suelo de margas carbonáticas (calcáreas) del Mesozoico, se publicaron datos de K de 7.22, 7.18 y 6.65 mm/h en distintos puntos de muestro en la misma zona para el año de 2013 (H. Kelishadi et al., 2014). Para un estudio en España en sitios de pastos seminaturales en zonas subhúmedas se midió 90, 68.4, 21.6 y 43.2 mm/h, en bosque ribereño restaurado resultó con 39.6, 28.8, 68.4, 43.2 mm/h y para bosque ribereño maduro: 18, 36, 43.2, 32.4 mm/h (D. Morret-Fernández et al., 2019).

Para comparar los resultados también se contrasta con tipos de suelo de arena, limo y arcilla, donde se obtuvieron valores relativamente bajos en comparación al resto de las publicaciones, ya que el suelo franco arenoso tuvo una conductividad de 3.4 mm/h, en franco limoso el valor fue de 6.1 mm/h. Cuando la prueba fue en el tipo Cambisol, el valor fue de 6.3 mm/h (Dohnal et al., 2010). Por último, un trabajo con una cobertura similar a la de este trabajo fue analizada en Kenia, los resultados revelan que zonas cubiertas por árboles, la K mayor fue de 73.3 mm/h, para campos de pasto el valor fue de 25 mm/h y para suelo desnudo fue de 17 mm/h (Mutuku et al., 2019). En nuestra zona de interés los suelos dominantes son poco desarrollados y poco profundos, y bajo diferentes coberturas proveemos algunos valores de referencia que contribuyen a entender mejor el proceso de infiltración en diversos ambientes naturales y transformados.



**Figura 3.** Mapa predictivo de la conductividad hidráulica de agua en el municipio.

Gracias a la comparación con otros trabajos que se basan en el mismo cálculo con el mismo instrumento, los resultados son consistentes, aunque en general son bajos, y no reflejan los parámetros máximos de infiltración de todo el municipio. El mapa presentado para todo el municipio representa una herramienta de planeación importante que puede ser usada para dirigir esfuerzos de muestreo a zonas particulares. El sistema presentado tiene potencial, considerando que fueron pocos puntos de muestreo y las extensiones totales del parque y del municipio de Querétaro.

El enfoque de mapeo digital de suelos considerando distintos tipos de vegetación y distintos rasgos topográficos para analizar K, permite crear un modelo para obtener la información de todo el parque a partir de aprendizaje por computadora. Este modelo consiente obtener relativamente buenos resultados sin tener que realizar mucho más esfuerzo ni inversión de tanto

tiempo, considerando que no se puede medir K directamente en todo el territorio de interés.

El mapeo digital de la infiltración de agua en suelos es un tipo de investigación que se puede aprovechar en muchos sentidos. Existen oportunidades de investigación a diversas escalas, del nivel nacional al nivel local. Se cuenta con herramientas para obtener covariables ambientales de K en cualquier punto del espacio geográfico y con sistemas de información geográfica capaces de analizar cantidades masivas de información espacial. Igualmente, herramientas de medición en campo como el infiltrómetro de disco ofrecen versatilidad para muestrear de manera intensiva gracias a sus características de uso e implementación (ejemplo., menor gasto de agua que otros dispositivos disponibles). Finalmente, en el ámbito de la programación, el Laboratorio Nacional de Visualización Científica Avanzada (LAVIS, UNAM) ofrece oportunidades únicas de procesamiento, rendimiento y escalabilidad de

nuevo conocimiento, gracias al supercómputo, con lo que se tienen las herramientas necesarias para ofrecer trabajos de investigación a distintas escalas y, cada vez, con un mayor alcance.

## Conclusión

El mapeo digital de suelos es una herramienta que se puede proyectar en distintos tipos de estudios de suelos, gracias a la combinación de tecnologías como la percepción remota y la inteligencia artificial, **concluimos que es posible predecir la variabilidad espacial de la conductividad hidráulica en el parque analizado.** Aunque la variabilidad espacial de K en el parque es muy amplia y más datos se requieren para conocer detalladamente cada factor que afecta la infiltración en cada cobertura, nuestros resultados abren muchas posibilidades para la investigación futura en el corto plazo, esto implica un sistema de trabajo de alto valor y muy versátil para futuros proyectos.

**El flujo de trabajo que se presenta en este estudio representa una potencial herramienta para escalar el estudio de la conductividad hidráulica a toda el área del municipio de Querétaro.** Esto se logra porque la construcción de un modelo, que predice las propiedades de un suelo en función de las características ambientales del lugar, permite hacer predicciones en otros sitios (ejemplo, municipio de Querétaro) con características ambientales similares a las del lugar de estudio (Parque Recreativo Joya-La Barreta).

Este trabajo es financiado por el Instituto de Ecología del Municipio de Querétaro. Los autores agradecen el apoyo adicional del proyecto UNESCO International Geoscience Programme (grant no. 765).

## Referencias

- Amoozegar, A. y Warrick, A.W. (1986). *Hydraulic Conductivity of Saturated Soils: Field Methods*. In *Methods of Soil Analysis*, A. Klute (Ed.). <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c29>
- Beven, K.J., y Kirkby, M.J., (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.* 24(1), 43–69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>.
- Bigelow, C. A., Bowman, D. C., y Cassel, D. K. (2004). Physical properties of three sand size classes amended with inorganic materials or sphagnum peat moss for putting green rootzones. *Crop Science*, 44(3), 900-907.
- Castiglioni, M. G., Behrends Kraemer, F. y Marquez Molina, J. J. (2018). Conductividad hidráulica saturada determinada por distintos procedimientos en suelos con alta humedad inicial. *Ciencia del suelo*, 36(2), 158-169.
- Centeno, L. N., Hu, W., Timm, L. C., She, D., da Silva Ferreira, A., Barros, W. S., ... y Caldeira, T. L. (2020). Dominant control of macroporosity on saturated soil hydraulic conductivity at multiple scales and locations revealed by wavelet analyses. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 1686-1702.
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., J. Wehberg, Wichmann, V., y Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development* 8, 1991–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
- D. Moret-Fernández, Latorre, B., Giner, M.L., Ramos, J., C.L. Alados, Castellano, C., M.V. López, Jiménez, J.J., y Pueyo, Y. (2019). Estimation of the soil hydraulic properties from the transient infiltration curve measured on soils affected by water repellency. *CATENA* 178, 298–306. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.03.031>
- Dohnal, M., Dusek, J., y Vogel, T., (2010). Improving Hydraulic Conductivity Estimates from Mini-

- disk Infiltrometer Measurements for Soils with Wide Pore-Size Distributions. *Soil Science Society of America Journal* 74, 804–811. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0099>
- Fiedler, F.R., Frasier, G.W., Ramirez, J.A., y Ahuja, L.R., (2002). Hydrologic Response of Grasslands: Effects of Grazing, Interactive Infiltration, and Scale. *Journal of hydrologic engineering* 7, 293–301. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(2002\)7:4\(293\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(2002)7:4(293))
- Guevara, M., Taufer, M., Vargas, R., 2021. Gap-free global annual soil moisture: 15 km grids for 1991–2018. *Earth system science data* (Print), 13, 1711–1735. <https://doi.org/10.5194/essd-13-1711-2021>
- H. Kelishadi, M.R. Mosaddeghi, M.A. Hajabbasi, y Ayoubi, S., (2014). Near-saturated soil hydraulic properties as influenced by land use management systems in Koohrang region of central Zagros, Iran. *Geoderma (Amsterdam)* 213, 426–434. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.008>
- Hanumantha Rao, B., Sridhar, V., Rakesh, R. R., Singh, D. N., Narayan, P. K., y Wattal, P. K. (2009). Application of In-situ Lysimetric Studies for Determining Soil Hydraulic Conductivity. *Geotechnical and Geological Engineering*, 27(5), 595–606. <https://doi.org/10.1007/s10706-009-9260-5>
- Hengl, T. (2021). Landmap. <https://github.com/envirometrix/landmap>
- Instituto de Ecología y Cambio Climático [IECC], (2023). *Cuaderno de Investigación No. 4*.
- Jürgen Böhner, Selige, T., (2002). Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalization. *Göttinger Geographische Abhandlungen* 115. [WWW Document]. ResearchGate. URL [https://www.researchgate.net/publication/267821689\\_Spatial\\_prediction\\_of\\_soil\\_attributes\\_using\\_terrain\\_analysis\\_and\\_climate\\_regionalization](https://www.researchgate.net/publication/267821689_Spatial_prediction_of_soil_attributes_using_terrain_analysis_and_climate_regionalization) (accessed 4.5.24).
- Koethe, R. y Lehmeier, F. (1996): 'SARA, System zur Automatischen Relief-Analyse', Benutzerhandbuch, 2. Auflage
- Kumar, S., Anderson, S.H., Udawatta, Ranjith P, y Kallenbach, R.L., (2024). *Agroforestry and grass buffer influences on water infiltration for a grazed pasture system*. Umsystem.edu. <https://hdl.handle.net/10355/84711>
- Lagacherie, P. (2008). Digital soil mapping: A state of the art. In A. E. Hartemink, A. B. McBratney, & M. De Lourdes Mendonça Santos (Eds.), *Digital Soil Mapping with Limited Data* (pp. 3–14). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8592-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8592-5_1)
- McBratney, A. B., Mendonça Santos, M. L., y Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1–2), 3–52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
- METER (2024), MINI DISK INFILTRÓMETER Manual. <https://metergroup.com/products/mini-disk-infiltrometer/mini-disk-infiltrometer-support/> Accesado en abril 12, 2024.
- Mutuku, D., Kamiri, H., Ndufa, J., Kiama, S., y Mware, M., (2019). *Influence of Vegetation Cover and Topographic Position on Water Infiltration, Organic Matter Content and Aggregate Stability of Grassland Soils in Semi-Arid Kenya*. Karu.ac.ke. <https://karuspace.karu.ac.ke/handle/20.500.12092/2380>
- Refaeilzadeh, P., Tang, L., y Liu, H. (2009). *Cross-Validation*. In L. LIU & M. T. ÖZSU (Eds.), *Encyclopedia of Database Systems* (pp. 532–538). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-39940-9\\_565](https://doi.org/10.1007/978-0-387-39940-9_565)
- Reynolds, W D; B T Bowman; R R Brunke; C F Drury y C S Tan. (2000). Comparison of tension infiltrometer, pressure infiltrometer and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 478–484.
- Usovich, B., y Lipiec, J., (2021) Spatial variability of saturated hydraulic conductivity and its links with other soil properties at the regional scale. *Sci Rep* 11, 8293. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86862-3>
- Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M.G. y van Genuchten, M.T. (2010). Using Pedotransfer Functions to Estimate the van Genuchten–Mualem Soil Hydraulic Properties: A Review. *Vadose Zone Journal*, 9, 795–820. <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0045>

- Wadoux, A. M. J. C., Minasny, B., y McBratney, A. B. (2020). Machine learning for digital soil mapping: Applications, challenges and suggested solutions. *Earth-Science Reviews*, 210(Sep-tember), 103359. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103359>
- Walter, C., Lagacherie, P., y Follain, S. (2006). *Chapter 22 Integrating Pedological Knowledge into Digital Soil Mapping*. In P. Lagacherie, A. B. McBratney, & M. Voltz (Eds.), *Digital Soil Mapping* (Vol. 31, pp. 281–615). Elsevier. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(06\)31022-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0166-2481(06)31022-7)
- Warner, D.L., Guevara, M., Callahan, J., y Vargas, R., (2021). Downscaling satellite soil moisture for landscape applications: A case study in Delaware, USA. *Journal of hydrology. Regional studies* 38, 100946–100946. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100946>
- Yolcubal, I., Brusseau, M. L., Artiola, J. F., Wierenga, P., y Wilson, L. G. (2004). 12 - *Environmental Physical Properties and Processes*. In J. F. Artiola, I. L. Pepper, & M. L. Brusseau (Eds.), *Environmental Monitoring and Characterization* (pp. 207–239). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-012064477-3/50014-X>

**CUADERNO  
DE INVESTIGACIÓN  
DEL INSTITUTO  
DE ECOLOGÍA Y  
CAMBIO CLIMÁTICO**

Número 6 / Agosto de 2024



**“Este programa es público, ajeno a cualquier partido político. Queda prohibido su uso para fines distintos a los establecidos en el programa”.**