

El Agua en la Megalópolis de México

Coordinadores
Víctor Ávila Akerberg
Tanya González Martínez



EL AGUA EN LA MEGALÓPOLIS DE MÉXICO

Este libro cumplió con la revisión de pares doble ciego, utilizando revisores externos de la institución editora y de acuerdo con los lineamientos editoriales vigentes del Reglamento Editorial de la Universidad Autónoma del Estado de México.

El Agua en la Megalópolis de México/ DR. © Víctor Ávila Akerberg

ISBN: 978-607-29

Primera edición, 2025

Diseño de portada y contraportada: Alan Jhoseep Millán Covarrubias

Diseño y trabajo editorial: Mónica Monserrat Díaz Reynoso y Alan Jhoseep Millán Covarrubias

Prohibida la reproducción o almacenamiento total o parcial por cualquier medio o método sin la autorización por escrito de los titulares de los derechos.

Impreso en México

El contenido y la originalidad del libro es responsabilidad exclusiva de los autores. Las opiniones expresadas en el libro no representan necesariamente las del consejo editorial.

Financiado por el Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) con fondos del Ministerio Federal de Relaciones Exteriores de la República Federal de Alemania (AA)



Deutscher Akademischer Austauschdienst
Servicio Alemán de Intercambio Académico



Industria

- Sistemas de captación de agua de lluvia para una gestión integral del agua en la Megalópolis de México** 9
Torres Márquez José Rodolfo, Izaguirre José Luis y Ardiles Gloria Vilma Soledad

Gobierno

- Perspectiva hídrica de las áreas naturales protegidas de la cuenca del río Tejalpa, Zona Metropolitana de Toluca** 15
Isabel Reyes-Avilés y Erasto Domingo Sotelo-Ruíz

- La bioindicación y el biomonitoreo como herramientas de apoyo en la gestión integral del agua en la Megalópolis de México** 23
Alexis Joseph Rodríguez-Romero y Itzel Ibarra-Meza

Academia

- Reserva de la biosfera del centro de México y el abasto de agua a la Megalópolis** 29
Fernando Jaramillo Monroy

- Análisis de las soluciones basadas en la naturaleza (SBN), aplicadas a la sobreexplotación del agua subterránea en la Megalópolis de México** 39
Cauhtémoc Aquiles Zúñiga Lázaro, Jesús Barrera Rojas y Hasbleidy Palacios Hinestroza

- Colectividad alrededor del agua en las chinampas y el papel del gobierno en Xochimilco** 49
Libertad Castro-Colina

- La logística de última milla, parques y zonas industriales: un riesgo para la gestión integrada del agua en la Megalópolis de México** 61
Marta García-Galván y Francisco Herrera Tapia

- El acceso a agua entubada en la Megalópolis de México: desigualdades socioeconómicas y retos para la política pública** 75
Daniel A. Revollo-Fernández, Carolina M. Medina-Rivas, Lilia Rodríguez-Tapia y Jorge Morales-Novelo

- Gobernanza y gestión hídrica en la cuenca del alto río Lerma, Estado de México-** 83
Cesar H. Anchante Saravia, Benjamín Zamudio González, Alondra N. Narcizo Rico y Eduardo Salazar Madero

- La ciudad capital como parte de la cuenca de México 1851-1864** 89
Claudia Coronel Enríquez

El uso sostenible de la presa del Llano y presa Taxhimay en Villa del Carbón, Estado de México: Gestión para su subsistencia, opinión a partir del estudio de la calidad del agua Erika Toledo Trejo	99
Constelación normativa de la gestión del agua en la Megalópolis de México: Síntesis y antítesis Alma Leslie Moreno Salinas	105
Gestión sostenible del agua en odontología: desafíos ambientales y e estrategias ante la contaminación del agua por metales pesados Alejandra García-Mares, Jonás Millán Castañeda e Iván Maceda Mejías	119
Cálculo de huella hídrica como herramienta para la gestión sostenible del agua Daniel Osorio González, Luis Enrique Díaz Sánchez, Jesús Magyber de Jesús Miranda, Michelle Abigail Fuentes Acosta y Víctor Manuel Soto Márquez	127
REGATEC, propuesta de un monitoreo del uso del agua para un consumo responsable en Zacapoaxtla, Puebla Lourdes Becerra García	137
Diversidad de reglas y prácticas locales en la gestión del agua en Morelos: Pluralismo jurídico y resistencias cotidianas Nohora Beatriz Guzmán Ramírez	141
Resiliencia hídrica urbana en las ciudades Marisol González Aguilar y Arturo Venancio Flores	151
Mecanismos de pago por servicios ambientales en ecosistemas forestales del Estado de México, como instrumentos para la gestión integral del agua en la Megalópolis Carlos Rubén Aguilar-Gómez, Laura Millán-Rojas, Gabino Nava-Bernal y Víctor Ávila-Akerberg	159
Retos que limitan la gestión integral del recurso hídrico, el sistema comunitario de agua de Atlautla, Estado de México Esteban Cuitlahuac López-Bravo, Alma Iris Ríos-Espinosa y Norma Lucía Flores-Zamudio	169
Mujeres promotoras de soluciones basadas en la naturaleza en el Bosque de Agua, Morelos, México: Retos ante el cambio climático: Hacia la gestión integral del agua en la Megalópolis de México. Caso de la cuenca del Balsas, subcuenca del río Apatlaco Jazmín González-Zurita y Úrsula Oswald Spring	177
Chimalhuacán, el agua y los olivares Ixchel Parola-Contreras, Georgina Contreras-Santos y María del Rocío Santamaría-Cuellar	183
Dinámica espacio-temporal y proyección tendencial en la reserva ecológica comunitaria San Miguel Topilejo, Ciudad de México Gabriela Rivera-Ojeda, Raúl Vera-Alejandre, Blanca E. Gutiérrez-Barba	193

La contraloría ciudadana autónoma del agua como un sujeto de la sustentabilidad hídrica	203
Diego Antonio Contreras Rodríguez	
Disponibilidad de elementos potencialmente tóxicos en sedimentos que representan riesgo para el ambiente y la salud de la población del Nevado de Toluca, México	215
Germán Martínez Alva, María del Carmen Colín Ferreyra, Armando Sunny García Aguilar, Liliana Ivette Ávila Córdova y Araceli Consuelo Hinojosa Juárez	
Estrategias del manejo sustentable del agua en sistemas de producción lechera	223
María del Carmen Espejel del Moral, Sandra González Luna, Manuel Andrés González Toimil, Luis Jesús López Morales, Esperanza García López y Itzayana Mejía Flores.	
Estado actual del conocimiento de la flora acuática de la Megalópolis de México	231
Hugo López-Camarillo, Alexis Josué Sánchez-Lara, Nadia Elizabeth Siordia-González e Isolda Luna-Vega	
Justicia hídrica restaurativa: una propuesta analítica para el estudio de los ríos contaminados	241
Jessica Estefanía Jiménez Montoya	
Dos modelos de gestión del agua en la Megalópolis de México	253
Alfredo Méndez Bahena, Anna Rosa Domínguez Corona y Benjamín Méndez Bahena	
Cubierta forestal y el agua: bases para la gestión hídrica en el Ajusco	263
Alma Abigail Luna-Gil, Ángel Rolando Endara Agramont, Luis Fernando Gopar-Merino y Todd S. Fredericksen	
Transición hacia el fin al paradigma extracción-desecho en la región suroriente de la Cuenca de México	269
Eloísa Domínguez Mariani y Carlos Vargas Cabrera	
La gestión del agua en la V zona de Ecatepec de Morelos	273
Maribel Espinosa-Castillo	
Alternativas sostenibles del agua en la Megalópolis en el Patriaceno. Mujeres, comunidades indígenas, sociedad y gobiernos para la recuperación hídrica	285
Úrsula Oswald-Spring	
Captación, almacenamiento y purificación de agua de lluvia como herramientas para la sustentabilidad hídrica	293
María de Lourdes Maya-Salazar y Humberto Thomé-Ortiz	
SOCIEDAD CIVIL	
Disponibilidad de agua y cambio climático: análisis y proyecciones para la Megalópolis de México.	303
Cristina Eduardo-Soto, Miguel A. Gómez-Albores, Raymundo Ordoñez-Sierra ¹ , José Luis Expósito-Castillo, Carlos Alberto Mastachi-Loza, Alejandro Tonatiuh Romero-Contreras, Víctor Josué Arriaga- Núñez.	

Ensayo: una mujer de la megalópolis y el agua Gie Bele Gilbert Sandoval	315
Al rescate del Río Salado: Historia de resiliencia para la rehabilitación de un humedal de tratamiento en Tlapanaloya, Tequixquiac Selene Escorza Estrada, Cynthia Nicolás Sánchez, Emanuel Ramírez Reyes y Eliseo Cantellano de Rosas	321
Hacia la gestión integral del agua en la Megalópolis de México. Estrategias de sostenibilidad en la gestión integral del agua Jaen G. Peralta y Emilio Torres Pérez	325
El agua ante la tradición y la modernidad Julio César Mondragón García	331
Agua para todos: El Humedal hacia una gestión hídrica sustentable en la Megalópolis de México Mayela Eunice Véliz-Cantú y Miguel Ángel Silva-Flores	343
Megalópolis: Desigualdad y olvido más allá de la Ciudad de México Marian Herrera Carlos	351
Educación ambiental y ecociudadanía: dimensiones claves para la promoción de la cultura del agua en la ciudadanía de la megápolis Stephanie Segura-Espinosa	355

33

Captación, almacenamiento y purificación de agua de lluvia como herramientas para la sostenibilidad hídrica

María de Lourdes Maya-Salazar¹ y Humberto Thomé-Ortiz^{1*}

¹Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales. Universidad Autónoma del Estado de México
(*autor de correspondencia: hthomeo@uaemex.mx.com)

Resumen

El presente capítulo busca ilustrar la contribución que el Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR) de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx) ha realizado de cara a la problemática de escasez de agua y la falta de redes de suministro en zonas rurales y periurbanas del centro de México. Para ello se presenta el diseño e implementación de un sistema de captación, almacenamiento y purificación de agua de lluvia que ha permitido complementar el abasto hídrico de este Instituto, de manera innovadora y sustentable. Surge la necesidad de plantear estrategias innovadoras para el abastecimiento del líquido vital. La Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx) es una institución comprometida con los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) por lo que ha impulsado el desarrollo de infraestructuras para el aprovechamiento integral del agua de lluvia. El primer proyecto que se desarrolló en la UAEMéx fue el sistema de captación, almacenamiento y purificación de agua de lluvia del Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR); un organismo académico situado en el suelo rural del municipio de Toluca, en la comunidad de San Cayetano de Morelos. El proyecto consiste en un sistema de captación de agua de lluvia, a partir de una superficie plana de 2000 metros cuadrados, con una capacidad de almacenamiento de 104 metros cúbicos, que posteriormente es tratada mediante sistemas de filtrado que permiten la purificación del agua en diversas etapas. Con esta iniciativa, desde el 2019, el edificio del ICAR ha sido autosuficiente en términos de abastecimiento de agua de servicios, para consumo humano y agua desionizada para sus laboratorios y el de otros espacios científicos de la UAEMéx, atendiendo a una comunidad de más de 100 personas. Esta experiencia ha servido como un referente para impulsar un modelo de captación de agua de lluvia en toda la Universidad Autónoma del Estado de México, así como de otras instituciones

que han mostrado interés por replicar el modelo. Se concluye que el aprovechamiento integral del agua de lluvia representa una oportunidad para generar esquemas de abasto complementario de agua que son viables en una escala institucional.

Introducción

La disponibilidad de agua, es una problemática prioritaria en el siglo XXI, clave para la transición socioecológica hacia la sostenibilidad, dadas las múltiples contradicciones que existen entre la gestión de los recursos hídricos, el crecimiento económico y la relación entre ser humano y naturaleza.

El agua es un elemento imprescindible para el desarrollo socioeconómico, el abasto energético, la producción de alimentos, el mantenimiento de los ecosistemas, el desarrollo de actividades culturales y, en general, para la sobrevivencia de los seres humanos. Además, es pieza clave para la sociedad debido a que le permite al hombre su adaptación ante el cambio climático y permite mitigar sus efectos negativos.

El agua, más que un recurso o una mercancía, es un bien colectivo; un elemento constitutivo de la trama de la vida y un derecho fundamental de cada persona. Sin embargo, los modelos económicos dominantes han orientado el acceso al agua en función de la clase social de pertenencia o el capital económico que se despliegue. Por ello, resulta imperativo encontrar fuentes alternas de abastecimiento de agua que caodayven a una mayor cobertura de este servicio, particularmente en el caso de las instituciones públicas.

A medida que la población mundial crece, se incrementa la necesidad de conciliar la competencia entre las muy diversas demandas de los recursos hídricos para que las comunidades puedan abastecerse del vital líquido (ONU- AGUA, 2023). Sin embargo, la disponibilidad de agua tiene que ver con un tema de justicia social e inclusión, toda vez que

la accesibilidad está determinada en función de la clase social de pertenencia, de si se está en un emplazamiento urbano o rural o incluso de la región del mundo en la que se habite (Laurent y Pochet, 2015). Por ello, una tarea fundamental de las instituciones donde se produce conocimiento es contribuir al uso eficiente y disponibilidad de agua para todas las personas y en todos los ámbitos.

Ciertamente, la crisis hídrica es un problema de grandes proporciones, que puede enmarcarse en lo que algunos intelectuales han definido como la era del Antropoceno (Trischler, 2017) que consiste en el advenimiento de una nueva era geológica, vinculada a los efectos antrópicos sobre el ambiente en la Modernidad. Bajo este esquema interpretativo, resulta necesario comprender la acción humana en términos de las responsabilidades que por posición en la estructura socioeconómica competen a cada actor o grupo, además de reflexionar que estos efectos negativos no sólo afectan a los seres humanos, sino también a otras formas de vida no humanas con las que cohabitamos el planeta (Blaser, 2019).

En ese sentido, se puede afirmar que la crisis hídrica mundial apremia medidas urgentes que mitiguen y garanticen el acceso a dicho recurso, siendo la reutilización de este elemento un aspecto clave para su conservación y disponibilidad en el mediano y largo plazo. Por este motivo es indispensable generar propuestas sobre la reutilización del agua a través de diversas alternativas que coadyuven en el aprovechamiento más eficiente que se pueda hacer del recurso.

Por otra parte, resulta importante reflexionar en torno a los impactos actuales y futuros que tendrán las sequías, especialmente en las zonas más densamente pobladas de México, como la megalópolis en la que confluyen las zonas metropolitanas del Valle de Toluca y del Valle de México. En el caso de la región centro, es especialmente sensible la situación que presentan la Ciudad de México y el Estado de México. Para el 2024 se reportó la posibilidad de enfrentar el “día cero”, debido a un descenso dramático de los niveles del Sistema Cutzamala, que impidieran el abastecimiento del vital líquido a las grandes metrópolis del centro del país (Mejía, 2024). Esta evidente disminución de agua en los principales sistemas hídricos de almacenamiento que suministran a las grandes concentraciones urbanas, son una muestra de los efectos del cambio

climático que cada vez son más claras y que, en uno u otro sentido, nos invitan a impulsar procesos de transición socioecológica, fincados en el conocimiento científico y en las creencias que tenemos respecto al uso del agua. Es por ello que, tanto individuos como grupos sociales, somos responsables de generar acciones de gestión responsable del agua y de mitigación de la crisis hidrológica. Es especialmente importante el papel que las universidades juegan en estas tareas propositivas, tanto desde el punto de vista del desarrollo tecnológico, como de la gestión administrativa y de las prácticas implementadas por las instituciones frente a sus problemáticas específicas de abastecimiento de agua.

Los métodos de captación de agua de lluvia se han documentado desde la antigüedad, pero actualmente se consideran como una alternativa factible ante la crisis de escasez hídrica, toda vez que representa una técnica integral, sustentable y de bajo costo. Se trata de una herramienta relativamente sencilla que puede aportar soluciones a la falta de agua tanto en el ámbito urbano como rural. En el caso específico de las zonas rurales, los recursos hídricos suelen ser de difícil acceso, además de no conformarse dentro de la infraestructura de servicios públicos como las redes municipales de agua potable. Por otra parte, las instituciones públicas y privadas, así como las industrias, que cuentan con importantes superficies de captación de agua de lluvia, son francamente desaprovechadas; muchas veces por carecer de sistemas de almacenamiento y purificación, dado que ello requiere la disponibilidad de recursos financieros y humanos. Lo anterior, se sustenta nuestra experiencia empírica, pues una buena parte de los esfuerzos para mantener un sistema de agua de lluvia como el del ICAR tienen que ver con la capacidad de gestionar y generar recursos para su mantenimiento y funcionalidad, aunado con el talento universitario y el trabajo colaborativo.

La captación in situ de agua lluvia (Ver Figura 1) debe ser promovida como política pública y como programa social, pudiendo ser ya un mínimo necesario incluido dentro de las normativas de desarrollo urbano, en programas educativos, así como una alternativa de ahorro económico que podría tener un amplio alcance y difusión entre la población. Lo anterior implica que, paralelamente al desarrollo tecnológico de los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia, deben desarrollarse importantes

tareas de gestión de recursos, de inversión, planificación y divulgación de estas estrategias, que podrían considerarse relativamente simples, pero de profundo calado, como puede observarse en la experiencia de autosuficiencia hídrica del ICAR. Estas acciones son una afirmación de que las autoridades, en diversos niveles, valoran el agua como un recurso estratégico para la sostenibilidad, la reducción de riesgos y la prevención de desastres (Montes, 2008), así como de su liderazgo político en materia de sostenibilidad y bienestar humano. Lo anterior, nos permite entender que la transición sociohidrológica, a través de procesos de captación, almacenamiento y purificación de agua de lluvia requiere una perspectiva sistémica y compleja, que involucre la capacidad de las infraestructuras, el desarrollo tecnológico, la gestión de recursos humanos y financieros, el liderazgo directivo, la contribución de los usuarios y el establecimiento de nuevas formas de relacionarnos con la naturaleza. De acuerdo con Garduño (2022) la captación pluvial es definida como un sistema que busca aprovechar el agua de lluvia para la atención de diversas necesidades humanas. De acuerdo con su finalidad, estos sistemas se clasifican en tres categorías:

1. *Sistemas para uso humano*
2. *Sistemas para uso industrial, agrícola y ganadero*
3. *Recarga de mantos acuíferos en zonas urbanas.*

En virtud de esta clasificación, aunado a las características específicas del agua cosechada, así como a los objetivos perseguidos en cada sistema de captación, es posible optar por una o varias de estas tres clasificaciones. Entonces, las posibilidades de uso del agua cosechada, así como el alcance del sistema, dependen de un conjunto de características sociopolíticas, territoriales y climatológicas en donde se va a implementar la propuesta. Ello nos invita a reflexionar respecto a que los sistemas de captación, almacenamiento y purificación de agua de lluvia no pueden ser sistemas genéricos, ni de aplicación universal, sino que corresponden a diseños sociohidrológicos (trajes a medida) que responden a objetivos específicos y a la disponibilidad de recursos de diversa índole.



Figura 1. Superficie de captación 2000 m². Elaboración propia.

Nuestro sistema de captación, almacenamiento y purificación de agua de lluvia se ubica en el Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR) de la Universidad Autónoma del Estado de México, ubicado en la Unidad Académica el Cerrillo Piedras Blancas, en el poblado rural de San Cayetano de Morelos en el municipio de Toluca, Estado de México (Ver Figura 2).



Figura 2. Ubicación geográfica del ICAR. Elaboración: María de Lourdes Maya Salazar, a partir del software Arc-GIS.

Con la precipitación media anual de la zona en que se encuentra el ICAR se tiene un potencial de captación anual de 1,738,000m³ de agua y mensualmente de 144,833m³. Sin embargo, dada la infraestructura disponible, la capacidad actual de almacenamiento es apenas para la precipitación de un mes, no obstante, con esta agua se ha cubierto constantemente la demanda de una población aproximada de 100 personas, con un consumo per cápita de 35 litros al día. Sin embargo, de acuerdo con los registros de precipitación de los últimos 5 años, se podría abastecer la demanda de agua de hasta 200 personas. Lo cual es evidencia del potencial de estos sistemas cuando se cuenta con los recursos necesarios.

El edificio del ICAR fue construido con un sistema de captación de agua de lluvia, en una superficie de 2000m² (Ver Figura 1), al no contar con suministro de agua de la red municipal la utilización del agua de lluvia resultó en una alternativa viable, tomando en cuenta que, de acuerdo con la CONAGUA (2018), la precipitación media anual en el Estado de

México oscila los 869 milímetros al año, superior a la media nacional que es de 777 milímetros anuales; con una evaporación media anual de 720 milímetros anuales.

En este sentido, el sistema de captación, almacenamiento y purificación de agua de lluvia del Instituto constituye un laboratorio hidrosocial que pone en evidencia la posibilidad de alcanzar la autosuficiencia hídrica institucional, con lo que se contribuye a establecer paradigmas de gestión hídrica, basados en la experimentación y la evidencia empírica. A continuación, presentamos los procesos de captación y almacenamiento de agua de lluvia llevados a cabo en este espacio académico.

Captación y almacenamiento de agua de lluvia ICAR

Durante la captación del agua de lluvia (Ver figura 3) se disuelven o arrastran contaminantes que se depositan en los techos derivados de la contaminación atmosférica, excrementos de aves o roedores, debido a que en la zona hay campos de cultivo que arrastran polvo, hojas tierra o basura, el agua de lluvia puede presentar riesgos microbiológicos y contaminantes fisicoquímicos fuera de especificación que deben ser controlados; razón por la cual el agua antes de ser destinada a cualquier función debe ser sometida a un proceso de purificación que elimine los contaminantes no deseados y con ello la disminución de riesgos.



Figura 3. Captadores de agua de lluvia. Elaboración propia.

De acuerdo con (Avelar, 2019) el agua de lluvia sin tratamiento, proveniente de techos y depósitos limpios, puede usarse de manera segura para riego de cultivos y jardines, actividades de limpieza en el hogar, piscicultura y servicios sanitarios (no se recomienda para consumo humano de manera directa). Es necesaria la potabilización, mediante algún sistema de tratamiento certificado.

El almacenamiento actual para la captación de agua de lluvia en el ICAR, se lleva a cabo en 4 cisternas de cemento y 4 rotocisternas de grado alimenticio de 10,000 litros cada una (Ver Figura 4). Las cisternas de cemento están construidas de forma lineal en una superficie de 80 metros cuadrados, con una capacidad de 35 metros cúbicos cada una; tres de ellas almacenan el agua de lluvia captada y que será conducida por el proceso de purificación, la cuarta cisterna almacena el agua que ha pasado por el primer proceso de purificación y es enviada a la cisterna cuatro como agua de servicios para el ICAR. En conjunto con las cuatro cisternas de grado alimenticio, actualmente se cuenta con una capacidad de almacenamiento de 144 metros cúbicos, haciendo del Instituto un espacio universitario 100% autosuficiente en la reutilización y aprovechamiento del agua de lluvia, recurso natural que constituye un importante activo territorial en el Valle de Toluca. Lo anterior, implica pensar los elementos naturales como la lluvia, el viento o la energía solar como patrimonios territoriales que pueden ser claves para la satisfacción de las necesidades humanas.



Figura 4. Cisternas de almacenamiento. Elaboración propia.

Sistema de Purificación de agua de lluvia ICAR

El sistema de purificación de agua de lluvia del Instituto es un modelo probado a nivel institucional, con más de 5 años de funcionamiento, que aporta agua de calidad para una comunidad de aproximadamente 100 personas. Dicho sistema (Ver figura 5) consta de ocho etapas de remoción de contaminantes y, actualmente, abastece agua de servicios, agua bebible apta para consumo humano y agua desionizada, utilizada en los laboratorios del ICAR y también distribuida a diferentes espacios académicos de la UAEMéx como las Facultades de Química y Ciencias.

Con la reutilización de este recurso, podemos decir que el ICAR es un ejemplo institucional de sustentabilidad hídrica, aprovechando la precipitación pluvial de la zona, es decir que en armonía con los recursos naturales territoriales; se ha desarrollado una propuesta innovadora que aporta soluciones a las necesidades emergentes en el contexto de estrés hídrico y cambio climático, garantizando el acceso al recurso, en una escala institucional, sin depender de las fuentes del subsuelo ni de las redes públicas de agua potable.



Figura 5. Sistema de Captación de agua de Lluvia ICAR- UAEMEX. Elaboración propia.

Sin embargo, también es muy importante establecer que esto no ha sido una tarea fácil, puesto que la disposición a consumir agua de lluvia depende de aspectos culturales y antropológicos, en los que deben equilibrarse los posibles límites entre la desconfianza de esta fuente hídrica, el desconocimiento de los sistemas de purificación y la garantía de la inocuidad del producto y la seguridad de su consumo humano (Chubaka, Ross, y Edwards, 2017).

Implementación del sistema

De la selección adecuada de los filtros, depende la calidad del agua a obtener y por ello ha sido necesario invertir una considerable cantidad de tiempo en conocer las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua de lluvia que se cosecha en las instalaciones del ICAR ya que esta agua es el insumo base que determinará las características del proceso de purificación. Cada tipo de agua recolectada requiere un tratamiento específico que no puede ser generalizado, ello en aras de obtener un líquido inocuo y seguro para el consumo humano. En este sentido, un primer paso a desarrollar fue el análisis fisicoquímico del agua cosechada, el cual se llevó a cabo en laboratorios certificados externos al ICAR; en un segundo momento, se realizó la selección de los filtros a partir de la calidad del agua de la que se parte y del tipo de producto esperado. Lo anterior se traduce en la necesidad de generar diferentes protocolos en razón de si el agua a utilizar es para servicios, para laboratorios o para consumo humano. Otro aspecto relevante es el seguimiento mensual que se da al producto o tipo de agua que se desea obtener, lo cual ha significado un aprendizaje histórico que ha permitido desarrollar un sistema de purificación inocuo, a partir de diversas adecuaciones y experiencias, que incluyen la instalación de un generador de ozono, que impacta en la calidad del agua, la vida de anaquel del producto y recientemente (2023) se instaló un filtro para la producción de agua alcalina con muy buenos resultados. Otro aspecto importante es que en este año (2024) se incrementó nuestra capacidad de almacenamiento en un 40% pasando de 104m³ a 144m³, convirtiendo al ICAR en un espacio universitario 100% autosustentable en materia hídrica. Este sistema de purificación, al día de hoy, abastece de agua de servicios, agua bebible, agua desionizada y agua alcalina, con estos resultados queda demostrada la importancia de la implementación de los sistemas de captación de agua de lluvia, como alternativa eficiente y comprobada ante la escasez de agua, ya que garantizan el abastecimiento de este recurso, contribuyendo a mejorar la calidad de vida de las personas, la producción de alimentos, la producción agrícola e industrial. Especialmente importante es el papel que estas herramientas pueden jugar en la operación adecuada y sustentable de las instituciones educativas.

Impacto económico, social y cultural

Este proyecto ha tenido un impacto positivo en el Instituto, pues no solo lo ha convertido en un espacio 100% autosustentable en materia hídrica, al lograr obtener los tipos de agua utilizados en el ICAR, pues desde la perspectiva económica y administrativa, ha permitido generar un ahorro superior a los \$170,000.00 pesos mexicanos, al no necesitar comprar agua bebible desde la implementación del sistema, para el agua desionizada utilizada en los laboratorios, el ahorro al momento es de \$85,600.00 pesos y desde el punto de vista energético, el sistema de purificación utiliza equipos de bajo consumo, lo que implica que este impacto resulta mínimo y positivo en comparación con el gasto que se erogaría para adquirir el vital líquido de un tercero. Con el paso del tiempo, además de constituir un referente en materia de sustentabilidad, el sistema de captación, almacenamiento y purificación de agua del ICAR ha logrado generar un impacto económico por el ahorro que supone, así como el hecho de que el agua desionizada se distribuye en diferentes espacios universitarios para laboratorios de investigación y docencia, mientras que el agua bebible se da a conocer y se distribuye en eventos universitarios, todo ello en una lógica de economía circular y economía social, puesto que a la fecha no se cuenta con las condiciones para vender estos productos pero si son susceptibles de ser intercambiados por otros bienes, servicios o insumos de mantenimiento al interior de la propia comunidad universitaria.

En el ámbito cultural y social este proyecto ha sido un referente dentro de la Universidad en la captación, purificación y reutilización del agua de lluvia, estimulando que, actualmente, la UAEMEX ha implementado 15 sistemas de captación de agua de lluvia en diferentes espacios universitarios, donde el agua es utilizada para riego y en algunos casos para servicios, contribuyendo con esto a lograr una universidad verde y sustentable. De la misma manera este sistema ha sido ampliamente difundido por la prensa local y nacional en diversas notas periodísticas y programas televisivos.

Este sistema de purificación de agua de lluvia ha servido como un marco de referencia para diversas instituciones externas a la UAEMéx, las cuales frecuentemente se acercan al ICAR con el propósito de conocer el funcionamiento del sistema, para solicitar asesoría en sistemas propios; también es

visitado de forma periódica por diferentes espacios académicos de la propia Universidad como apoyo en algunas Unidades de Aprendizaje, así como por entidades gubernamentales interesadas en replicar estas prácticas. Lo anterior, se refleja en la atención que se ha dado a más de un centenar de visitas de diversa naturaleza. Con lo anterior, es posible afirmar que el sistema de agua de lluvia del ICAR se enmarca también dentro de los modelos de divulgación y acceso universal al conocimiento (Esquivel, Escudero y Peña, 2024).

Este proyecto es una alternativa real que puede contribuir en el logro del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (Agua y Saneamiento) toda vez que promueve la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y del saneamiento para toda la comunidad del ICAR.

Lo anterior, pese a la aportación relativamente sencilla de nuestro sistema no es una cuestión menor, máxime si pensamos en que, sin agua, no hay vida en la tierra. Evidentemente, existen varias propuestas de purificación de agua de lluvia, sin embargo, la particularidad del sistema del ICAR es su aplicabilidad en el corto y mediano plazo, así como el resultado contundente de su efectividad en una escala institucional específica. En el Instituto estamos conscientes de que, si no contribuimos con el ODS 6, corremos el riesgo de no alcanzar muchos de los otros Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), incluidos los que están relacionados con la alimentación, la nutrición, la salud humana, el crecimiento económico, las ciudades sostenibles y el medio ambiente (Gleason, 2020). Por otra parte, la reciente experiencia devastadora que nos dejó la pandemia por COVID-19 nos recuerda la importancia del acceso a instalaciones de agua, saneamiento e higiene, y que muchas personas en el mundo aún no lo tienen (ONU, 2022).

LLUVIA ICAR

Como un valor agregado a este trabajo, en noviembre 2020 se logró el registro de la marca “LLUVIA ICAR” ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Intelectual IMPI (Ver figura 6). Esta marca cubre el agua de lluvia purificada y envasada en nuestro instituto en botellas de cristal de 500 ml. El registro de esta marca atiende el compromiso que se tiene como Institución con el medio ambiente y el interés por seguir siendo una universidad verde y susten-

table, logrando la marca propia con identidad universitaria en el producto, el cual es completamente reciclable, incluidas las tapas, en una lógica de economía circular.



Figura 6. Botella 500ml. de "Lluvia ICAR". Elaboración propia.

Control de calidad

Si bien es cierto que la reutilización de agua de lluvia fue algo nuevo para nosotros por el desconocimiento de los contaminantes ambientales de la zona y del comportamiento del agua almacenada por tiempo indeterminado, tampoco contábamos con información sobre el funcionamiento y comportamiento del sistema, en este sentido y para conocer esta información se realizó un monitoreo a lo largo de dieciocho meses, atendiendo los siguientes aspectos:

1. Revisión de las etapas del proceso e identificación de puntos de control
2. Descripción de los puntos de control, indicando por qué son considerados puntos de control y el factor crítico que representa cada uno de ellos.
3. Matriz de variables consideradas para los puntos de control
4. Técnicas estandarizadas por los laboratorios del ICAR, para monitorear la calidad del agua mensualmente de manera interna.
5. Verificación y control externo
6. Vida de anaquel del producto
7. Programa de mantenimiento de los componentes de captación de agua de lluvia y del sistema de purificación de agua de lluvia
8. Elaboración de la documentación que da soporte al sistema de gestión de calidad bajo los

parámetros que establecen las NMX-CC-9001-IMNC-2015, Sistemas de Gestión de Calidad y NMX-EC-17025 IMNC-2018. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.

El monitoreo anual realizado a los diferentes puntos de control permitió conocer los cambios o alteraciones físicas, químicas y microbiológicas que puede presentar el agua de lluvia en las diferentes épocas del año.

Resulta necesario el seguimiento y monitoreo del sistema de purificación de agua de lluvia, así como documentar los procesos y registros. Lo anterior brinda información clave, no solo para planificar, sino también para establecer acciones de seguimiento, preventivas y correctivas, de control y mejora continua de cada proceso, así como de reducción de riesgos al consumir un producto que no cumpla con las especificaciones, físicoquímicas o microbiológicas de la normativa mexicana relacionada con el agua para consumo humano.

Hoy en día se lleva a cabo un monitoreo mensual interno del agua en los puntos de control establecidos y se realizan análisis externos en laboratorios certificados cada seis meses, con el propósito de verificar que los diferentes tipos de agua cumplen con lo que establece la norma, para el caso de agua bebible cumplir con la NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua (DOF, 2022).

Gestión financiera

La evaluación económico-financiera, a través de los indicadores planteados, permite concluir que con una inversión inicial de \$257,395.00 pesos mexicanos se estima una tasa interna de retorno de (TIR) de 3.75 años. Esto quiere decir que el proyecto alcanzó un equilibrio entre lo invertido y lo ingresado en dicho lapso, con este resultado se determinó que el proyecto ha sido económicamente viable.

Hoy en día, con más de cinco años de funcionamiento, se ha logrado esta TIR y el proyecto se ha consolidado como un proyecto sustentable y que se pretende que sea sostenible en su totalidad con la venta de agua bebible y agua desionizada. Es conveniente mencionar que este proyecto ha sido financiado por UAEMéx, durante el periodo 2022

al 2024 se consiguieron apoyos significativos por \$340,000.00 pesos mexicanos que han permitido dar mantenimiento al sistema, así como un incremento considerable (40%) en su capacidad de producir agua para laboratorios, de servicios y de consumo humano.

Experiencia

Este proyecto surgió de una necesidad real del ICAR, al no tener acceso a la red municipal de agua potable, por lo que la reutilización del agua de lluvia, rápidamente se concibió como una alternativa viable para el Instituto. Dicha experiencia ha dado reconocimiento al ICAR, no solo institucional y universitario por la implementación y manejo adecuado del sistema; sino que también ha sido un referente para otros espacios de la UAEMéx que han logrado replicarlo y obtener agua de servicios y para riego, así mismo, ha sido de interés para diferentes medios de comunicación, dependencias gubernamentales y representantes del sector productivo.

Pero, sin duda, la experiencia más importante ha sido desarrollar diversos conocimientos para articular un sistema de potabilización de agua de lluvia *sui generis*. Para lo cual es crucial el monitoreo mensual del agua de lluvia, a través de los puntos de control establecidos dentro y fuera del proceso de purificación en su comportamiento físicoquímico y microbiológico, en las diferentes épocas del año. Mediante este seguimiento se ha logrado garantizar el abasto de agua para el ICAR, en el marco de las condiciones edafoclimáticas que se presentan hasta el momento. Estamos seguros, que en el futuro se irán presentado variaciones que nos dejarán nuevos aprendizajes y frente a los cuales habrá que esgrimir estrategias adaptativas.

Otro aspecto relevante a considerar, dentro de esta experiencia institucional de aprovechamiento de agua de lluvia, es la dimensión social. Esto significa compartir colectivamente los esfuerzos para el mantenimiento del sistema, generar esquemas de comunicación y difusión que permitan la gestión y procuración de recursos para sostener la planta purificadora, así como el desarrollar una conciencia social y colectiva para el correcto aprovechamiento del agua que tanto esfuerzo con cuesta obtener.

Conclusión

La captación de agua de lluvia es una fuente alterna para obtener el vital líquido potabilizado, garantizando la disponibilidad del recurso para distintos propósitos, a un costo relativamente bajo. Después de los análisis realizados durante el seguimiento al monitoreo de la calidad del agua se puede concluir que los tres tipos de agua que se obtienen del sistema de purificación: agua de servicios, agua bebible y agua desionizada, cumplen con lo que establece la NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua” (DOF, 2022) y la norma de la American Society for Testing and Material para el agua desionizada (ASTM, 2018).

El lugar de captación de agua de lluvia, así como el uso que se le dará al recurso resultan de gran importancia ya que de ello dependerá la propuesta de los filtros de purificación necesarios para la remoción de contaminantes, tomando en cuenta que, la carga de contaminantes atmosféricos de una región a otra no es la misma.

La implementación de un sistema de purificación solo es la primera parte, mantenerlo en funcionamiento de forma permanente y adecuada requiere de un trabajo colectivo y monitoreo constantes y de la gestión de recursos financieros, que permitan conocer los límites de cada proceso para poder establecer medidas preventivas y/o correctivas que disminuyan riesgos sanitarios, así como mantenimientos programados que contribuyan a mantener la calidad del producto final.

Se observa que la reutilización y aprovechamiento del agua de lluvia, representa una alternativa útil para abastecer las demandas hídricas de comunidades pequeñas, donde exista una relación positiva entre disponibilidad, accesibilidad y requerimiento. Además de las actividades de mantenimiento y prevención, es importante mencionar el papel central que juega la cultura del manejo responsable del agua, la cual en el caso del ICAR ha permeado a toda la comunidad que de el formamos parte.

Problemáticas y oportunidades

A continuación (Ver Tabla 1) se presenta una síntesis relacional sobre la problemáticas y oportunidades detectadas en el caso analizado, con lo cual pretendemos abordar la relación ambivalente que existe entre infraestructuras, políticas, recursos y capital humano en la disponibilidad de agua potable para el caso de las instituciones educativas.

Tabla 1 Problemáticas y oportunidades para la gestión integral del agua de lluvia en el Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales de la Universidad Autónoma del Estado de México.

Problemáticas	Oportunidades
Falta de acceso a la red de agua potable municipal de Toluca.	Desarrollo de una alternativa, a través de un sistema de captación, almacenamiento y purificación de agua de lluvia.
Inexistencia de esquemas institucionales que permitan la comercialización del agua que el Insituto produce.	Establecimiento de esquemas de economía social y solidaria, a través del intercambio de productos y servicios entre espacios universitarios.
Escaso desarrollo de sistemas de purificación de agua de lluvia para consumo humano.	Desarrollo de un prototipo probado a lo largo del tiempo que permite establecer parámetros de disponibilidad e inocuidad del recurso.
Modelo de abasto hídrico altamente dependiente de las condiciones sociales, económicas y ambientales.	Adaptabilidad de modelos "in situ" con la finalidad de atender necesidades sociohidrológicas específicas.

Referencias bibliográficas

- ASTM. (2018). Standard Specification for Reagent Water. USA. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/99605/37d074ed08d-94150b7100a898490578e/ASTM-D1193-06-2018-.pdf>
- Avelar Roblero, J. U., Sánchez Bravo, J. R., Domínguez Acevedo, A., Lobato de La Cruz, C., & Mancilla Villa, O. R. (2019). Validación de un prototipo de sistema captación de agua de lluvia para uso doméstico y consumo humano. *Idesia (Arica)*, 37(1), 53-59. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019005000302>
- Blaser, M. (2019). On the properly political (disposition for the) Anthropocene. *Anthropological Theory*, 19(1): 74-94. <https://doi.org/10.1177/1463499618779745>
- Chubaka, C. Ross, K., y Edwards, J. (2017). Rainwater for drinking water: a study of household attitudes. *Water and Society*, 216: 299-311. <https://doi.org/10.2495/WS170291>
- DOF. (2022). NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. México. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0
- Esquivel, M., Escudero, A., y Peña-Estrada, C. (2024). Modelos de Divulgación Científica y Acceso Universal al Conocimiento: una Revisión Sistemática. *Diá-Logos*, 16(29), 43-61. <https://doi.org/10.61604/dl.v16i29.371>
- Gleason, J. (2020). *International Rainwater Catchment Systems Experiences, Towards Water Security*. IWA Publishing: London. <https://doi.org/10.2166/9781789060584>
- Laurent, E., y Pochet, P. (2015). Towards a social-ecological transition- Solidarity in the age of environmental challenge. *European Trade Union Institute: Belgium*. https://www.etui.org/sites/default/files/Guide_socio-ecological_EN_PRINT_web.pdf
- Montes, M. P. (2008). Avances en la Gestión Integral del Agua Lluvia (GIA-LL): Contribuciones al consumo sostenible del agua, el caso de "Lluviati" en México. *Revista Internacional de Sostenibilidad Tecnología y Humanismo*, (3), 39-57. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/7060/pacheco.pdf>
- Mejía, R. (02 de abril de 2024). Cuenta regresiva en el Sistema Cutzamala: ¿Cuánto falta para el 'Día Cero' desde HOY 2 de abril? Milenio. <https://www.milenio.com/politica/comunidad/dia-cero-cuanto-falta-para-sistema-cutzamala-se-quede-sin-agua>
- ONU. (2022). Agua Naciones Unidas. The United Nations
- ONU. (2023). Paz dignidad e igualdad en un planeta sano: Desafíos globales Agua. The United Nations <https://www.un.org/es/global-issues/water>
- Trischler, H. (2017). El Antropoceno, ¿un concepto geológico o cultural, o ambos? *Desacatos*, 54: 40-57. <https://www.scielo.org.mx/pdf/desacatos/n54/2448-5144-desacatos-54-00040.pdf>