

Gestión del agua y vulnerabilidad climática del Río Valles

Water Management and Climate Vulnerability of the Valles River

Recibido: 30 de mayo 2024
Aceptado: 19 de junio de 2024

Habacuc Lorenzo Márquez
Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Valles
<https://orcid.org/0000-0001-7060-6188>
Autor de correspondencia: habacuc.lorenzo@tecvalles.mx
Baldomero Ponce Medina
Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Valles
<https://orcid.org/0009-0000-7957-5007>
Cuitlahuac Mojica Mesinas
Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Valles
<https://orcid.org/0000-0001-8585-8249>
Raúl Altamirano Zúñiga
Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Valles
<https://orcid.org/0000-0003-4757-248X>

RESUMEN

Este estudio analiza la disminución significativa del caudal del Río Valles, un recurso hídrico crucial para la región de la Huasteca Norte en San Luis Potosí, México. La investigación se centra en comprender cómo la fragmentación institucional, la extracción intensiva de agua y los efectos del cambio climático han afectado negativamente tanto la cantidad como la calidad del agua en este río. Utilizando el método del flotador para medir caudales y el método Tennant para determinar caudales ecológicos, se observó una alarmante reducción en los flujos de agua en sitios críticos, como Veladero, en comparación con datos históricos. Los resultados subrayan la necesidad de mejorar la gobernanza del agua y de adoptar medidas de adaptación al cambio climático. Se concluye que es esencial implementar caudales ecológicos y políticas de gestión más estrictas para preservar la salud del río y garantizar la sostenibilidad hídrica de la región.

Palabras clave: Gobernanza del agua, cambio climático, caudal ecológico, Río Valles, sostenibilidad hídrica.

Abstract

This study analyzes the significant decrease in the flow of the Valles River, a crucial water resource for the Huasteca Potosina region in San Luis Potosí, Mexico. The research focuses on understanding how institutional fragmentation, intensive water extraction, and the effects of climate change have negatively impacted both the quantity and quality of water in this river. Using the float method to measure flow and the Tennant method to determine ecological flows, an alarming reduction in water flow was observed at critical sites such as Veladero, compared to historical data. The results underscore the need to improve water governance and adopt climate change adaptation measures. It is concluded that implementing ecological flows and stricter management policies is essential to preserve the river's health and ensure the region's water sustainability.

Keywords: Water governance, climate change, ecological flow, Valles River, water sustainability.

INTRODUCCIÓN

Los ríos, más que simples corrientes de agua, han sido manifestaciones esenciales del ciclo natural de la vida. La teoría del río continuo, ampliamente reconocida en la ecología fluvial, propone que los ríos no son entidades estáticas, sino sistemas dinámicos en constante cambio. Este flujo perpetuo no solo ha moldeado los paisajes, sino que también ha sostenido la vida a lo largo de sus cauces, conectando ecosistemas y comunidades (Vannote et al., 1980). Los ríos actúan como arterias que transportan agua, nutrientes, sedimentos y organismos, subrayando la importancia de su gestión sostenible, ya que cualquier alteración en su flujo puede tener repercusiones significativas en el medio ambiente y en las poblaciones humanas que dependen de ellos (Naiman et al., 2005).

El río Valles, ubicado en la región Huasteca Norte, en el estado de San Luis Potosí, México, se presenta como un ejemplo claro de un sistema fluvial cuya salud es vital tanto para el ecosistema regional como para las actividades humanas. Con un recorrido 3,178.71 km² desde su nacimiento en la Sierra Madre Oriental hasta su confluencia con el río Tampaón, el Valles ha sido un pilar de desarrollo agrícola, industrial y urbano. Sin embargo, en las últimas décadas, el río ha mostrado signos de estrés debido a factores como el crecimiento poblacional, la expansión industrial y los efectos del cambio climático, afectando tanto la cantidad como la calidad del agua y derivando en desafíos significativos para la región (Santacruz de León & Aguilar-Robledo, 2009).

La gestión del agua y la vulnerabilidad climática en la cuenca del río Valles son temas de creciente preocupación. El caudal del río, es decir, la cantidad de agua que fluye por su cauce en un determinado periodo ha disminuido en un 20% en las últimas décadas (Santacruz de León & Aguilar-Robledo, 2009). Este descenso refleja una reducción en la disponibilidad de agua, y por consiguiente un aumento en la concentración de contaminantes, comprometiendo la salud de los ecosistemas acuáticos y la seguridad hídrica de las comunidades locales. Ante esta situación, se han implementado diversas iniciativas para proteger y restaurar el río, incluyendo proyectos de tratamiento de aguas residuales y campañas de concienciación sobre el uso eficiente del agua (González Villela, Sánchez Chávez, Bravo Inclán, & Mijangos Carro, 2018). La región de Ciudad Valles ha enfrentado desafíos significativos en la gestión de sus recursos hídricos, agravados por el cambio climático y una sequía prolongada. Este fenómeno, que se ha manifestado en alteraciones en los patrones de precipitación y un aumento de las temperaturas, ha incrementado la presión sobre el río Valles, especialmente durante la temporada de estiaje, cuando la cantidad de agua disponible resulta insuficiente para sostener los sistemas productivos y satisfacer la demanda urbana. La extracción de agua para riego agrícola y uso urbano, junto con el vertido de aguas residuales, ha alterado significativamente la dinámica natural del río, reduciendo su capacidad de autorregulación y comprometiendo su función ecológica (Santacruz de León, 2012). En este contexto, es crucial comprender cómo estos factores, junto con la vulnerabilidad durante la temporada de estiaje, han influido en el caudal y, en consecuencia, en la disponibilidad de agua para las necesidades de la región (Dávila-Ortiz, Algara-Siller, & Velázquez-Zapata, 2020; Guevara Pérez, 2007; Alvizuri Tintaya & Pacheco, 2015; Martínez Bárcenas, Herrera Fernández, & Orozco Medina, 2022).

La gobernanza del agua, entendida como el marco de políticas, leyes y prácticas que rigen la gestión del recurso hídrico, ha jugado un papel crítico en la situación del río Valles (Wester, Hoogesteger, & Vincent, 2009). La falta de una gobernanza efectiva ha contribuido a la sobreexplotación del río y a la degradación de su ecosistema. En particular, la ausencia de

regulaciones adecuadas y la falta de coordinación entre las instituciones responsables han permitido prácticas insostenibles que han agravado los problemas de la cuenca (Santacruz de León, 2012). Evaluar y mejorar estos mecanismos de gobernanza es esencial para asegurar que el agua se gestione de manera equitativa y sostenible (Tortajada, 2010).

Este estudio tiene como objetivo general medir y comparar el caudal en ocho secciones del río Valles, utilizando datos históricos y actuales, para analizar cómo la gobernanza del agua, el cambio climático y el concepto de caudal ecológico han afectado la disponibilidad y calidad del agua. Este análisis permitirá identificar las áreas más vulnerables del río y proponer medidas de gestión que puedan aplicarse en Ciudad Valles y otras regiones con desafíos similares. Para alcanzar estos objetivos, se cuantificó el caudal en las secciones definidas, utilizando mediciones actuales y comparándolas con datos históricos (Guevara Pérez, 2007; Santacruz de León, 2012; Dávila-Ortiz et al., 2020; Alvizuri Tintaya & Pacheco, 2015; Martínez Bárcenas et al., 2022), se analizó el concepto de caudal ecológico en el contexto del río Valles, determinando los flujos mínimos necesarios para mantener la salud del ecosistema. Este aspecto es crucial, ya que un caudal ecológico adecuado es esencial no solo para la biodiversidad, sino también para asegurar que el río pueda continuar proporcionando agua de calidad para las comunidades que dependen de él (Poff et al., 1997).

La importancia de este estudio radica en la necesidad de abordar de manera efectiva los desafíos relacionados con la gestión del agua en la cuenca del río Valles. Este río ha sido vital como fuente de agua, así como un componente esencial del ecosistema local. La disminución del caudal y la degradación de la calidad del agua amenazan la biodiversidad, la salud pública y la economía de la región (Martínez-Austria & Bandala, 2017). Este estudio proporciona una base para la toma de decisiones en la gestión del agua en la cuenca del río Valles. Al medir y comparar el caudal en diferentes secciones del río, el estudio identificó las áreas más afectadas. Además, al analizar el impacto del cambio climático y la efectividad de la gobernanza del agua, el estudio ofrece recomendaciones para mejorar la gestión del recurso hídrico y reducir la vulnerabilidad de la región (Nava, Torres Bernardino, & Orozco, 2024; Oscar, 2024; Honkanen-Chagoya, 2024; Huerta-Vergara & Escolero, 2024). Existen limitaciones inherentes a este estudio. La disponibilidad y calidad de los datos históricos sobre el caudal del río Valles pueden ser dispares, lo que podría afectar la precisión de las comparaciones temporales (Santacruz de León, 2012). Además, el cambio climático introduce variables complejas que pueden ser difíciles de analizar de manera aislada (Dávila-Ortiz et al., 2020; Guevara Pérez, 2007; Alvizuri Tintaya & Pacheco, 2015; Martínez Bárcenas et al., 2022). A pesar de estos desafíos, el estudio se esfuerza por considerar todos los factores relevantes, aunque es posible que algunos aspectos del impacto del cambio climático no puedan ser completamente capturados.

Otra limitación es la capacidad de generalización de los resultados. Aunque este estudio se centra en el río Valles, los hallazgos pueden no ser aplicables a otras cuencas con características diferentes (Santacruz de León, 2012). Sin embargo, se espera que las metodologías y recomendaciones propuestas puedan servir como modelo para otras regiones que enfrentan desafíos similares en la gestión del agua (Guevara Pérez, 2007; Madrid Casado, 2020).

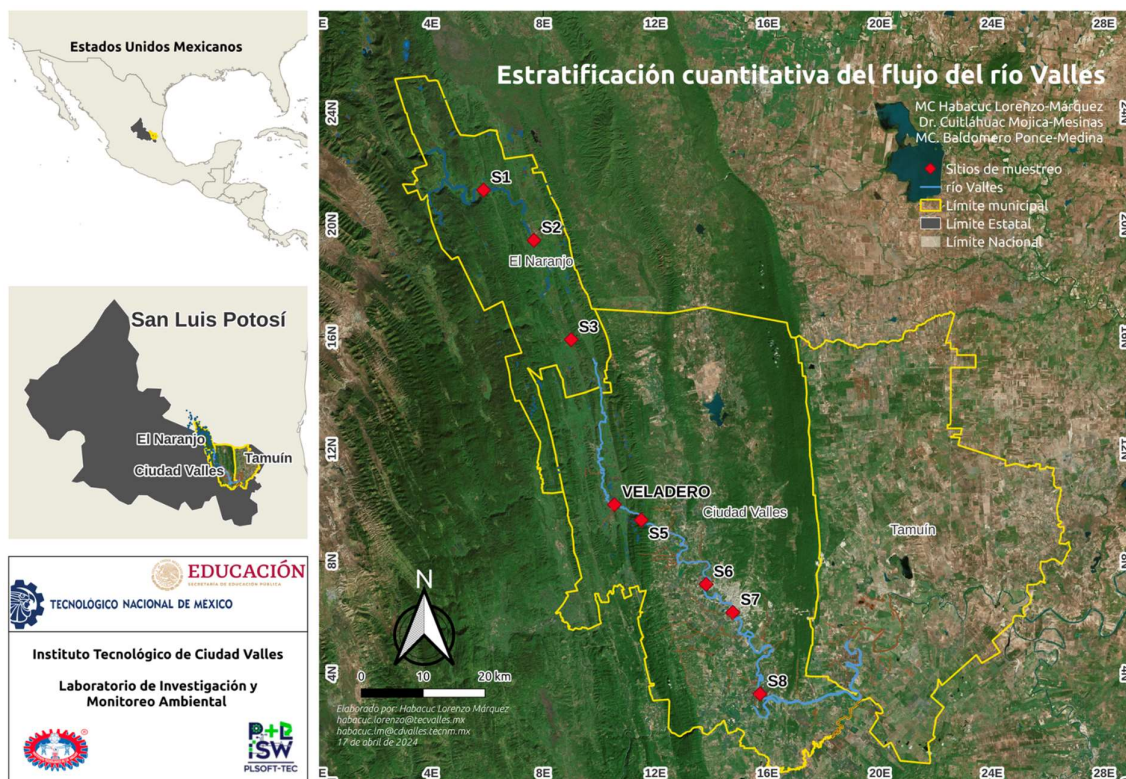
METODOLOGÍA

Localización

Ciudad Valles se localiza en la región oriental del estado de San Luis Potosí, en el corazón de la Huasteca Potosina, México. Está situada en las coordenadas 21°59' de latitud norte y 99°00'

de longitud oeste, a una altitud aproximada de 90 metros sobre el nivel del mar. Esta ciudad es atravesada por el río Valles, un afluente clave que nace en la Sierra Madre Oriental y fluye a través de la ciudad hacia el río Tampoán. El río Valles, con una longitud aproximada de 3,178.71 km², es vital para el desarrollo agrícola, industrial y urbano de la región. Como se observa en la Figura 1, la ubicación estratégica de Ciudad Valles y el curso del río destacan su importancia hidrográfica en la región, siendo fundamental tanto para la biodiversidad como para las actividades humanas en la Huasteca Potosina.

Figura 1.



Mapa de ubicación sitios de muestreo río Valles. Cd Valles, San Luis Potosí.

Nota: En el presente mapa de detallan los sitios seleccionados para calcular el caudal.

Fuente: Elaboración propia.

Criterios de inclusión de los sitios de estudio

Para seleccionar los sitios de estudio a lo largo del río Valles, se establecieron criterios específicos que garantizaran la representatividad de las diferentes condiciones ambientales y usos del suelo en la cuenca. Se incluyeron sitios ubicados en distintos puntos del curso del río, desde su nacimiento en la Sierra Madre Oriental hasta su confluencia con el río Tampoán, para captar la variabilidad en la calidad y cantidad de agua a lo largo del gradiente altitudinal. Además, se seleccionaron sitios que reflejan la influencia de actividades humanas, como la agricultura, la extracción urbana en Ciudad Valles, y las áreas industriales, así como zonas menos intervenidas que permiten evaluar el estado natural del río. Estos criterios aseguraron que los sitios abarcados incluyeran tanto zonas afectadas por la intervención humana como áreas relativamente conservadas, proporcionando un panorama completo de las dinámicas hidrográficas y ecológicas del río Valles.

Medición del caudal

Para medir el caudal del río Valles, se utilizó el método del flotador, un enfoque práctico y ampliamente reconocido en la hidrometría de campo. Este método involucra la medición de la velocidad superficial del agua mediante un objeto flotante. El procedimiento comenzó seleccionando un tramo recto del río con flujo uniforme y sin obstáculos significativos. Se estableció una longitud de prueba (L) entre dos puntos fijos a lo largo del río, y se liberó el flotador en el agua aguas arriba del primer punto. El tiempo (t) que el flotador tardó en recorrer la distancia establecida se midió con un cronómetro. Este proceso se repitió tres veces para obtener un tiempo promedio.

La velocidad superficial del agua (V_s) se calculó utilizando la fórmula:

$$V_s = L/t$$

Donde:

L es la longitud del tramo en metros,
t es el tiempo promedio en segundos.

Para estimar la velocidad media del flujo en toda la sección transversal del río, se aplicó un coeficiente de corrección (k), considerando que la velocidad superficial es mayor que la velocidad media debido a la fricción en el fondo y las orillas. La velocidad media (V_m) se determinó usando la relación:

$$V_m = k \times V_s$$

Donde:

k es un coeficiente empírico que varía típicamente entre 0.8 y 0.9.

La sección transversal del río (A) se calculó midiendo la profundidad en intervalos regulares a lo largo de una transecta perpendicular al flujo y multiplicando por el ancho del río.

Finalmente, el caudal (Q) se calculó como:

$$Q = A \times V_m$$

Este método permitió obtener una estimación del volumen de agua que fluye por el río por unidad de tiempo, expresado en metros cúbicos por segundo (m^3/s). A pesar de su simplicidad, el método del flotador es confiable y se ha validado en diversos estudios hidrométricos debido a su facilidad de aplicación en campo y su capacidad para ofrecer resultados precisos en condiciones adecuadas (Ahn, Yoon, & Ji, 2019; Majdalani, Chazarin, & Moussa, 2019; Eruola et al., 2021; Shin, Park, & Lee, 2016).

Método de caudal ecológico Tennant

El método de Tennant es una herramienta ampliamente utilizada para determinar el caudal ecológico necesario para mantener la salud de los ecosistemas fluviales. Este método se basa en la relación entre el caudal medio anual (CMA) y los porcentajes específicos de ese caudal que deben mantenerse a lo largo del año para asegurar que el ecosistema del río pueda sostenerse. Partiendo del cálculo del caudal medio obtenido mediante métodos como el

flotador, se aplican diferentes porcentajes del CMA, que varían desde el 10% hasta el 60% o más, dependiendo de las necesidades ecológicas específicas del río. Estos porcentajes permiten establecer caudales mínimos, óptimos y máximos que garantizan la supervivencia de la biodiversidad, así como la capacidad del río para cumplir con sus funciones ecológicas. El método de Tennant, aunque sencillo, se ha mejorado en varios estudios para reflejar mejor la variabilidad temporal y espacial del flujo, así como para adaptarse a diferentes contextos hidrológicos y ecológicos (Guo, 2009; Dong et al., 2012; Li & Kang, 2014; Fu, Wang, & Ye, 2020).

Análisis estadístico

Para evaluar las diferencias significativas entre los ocho sitios de muestreo a lo largo del río Valles, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, utilizando datos recolectados en triplicado para cada sitio. Previo al ANOVA, se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. Debido a que algunos datos no cumplían con estos supuestos, se aplicó una transformación de datos utilizando la técnica de Box-Cox, lo que permitió estabilizar las varianzas y acercar la distribución de los datos a la normalidad (Ahmad, Naing, & Rosli, 2014).

Posteriormente, se realizó el ANOVA para identificar diferencias significativas entre los sitios, seguido por un análisis post hoc de Tukey para determinar qué pares de sitios presentaban diferencias significativas específicas (McHugh, 2011). Todo el análisis se realizó utilizando Google Colab, aprovechando su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos y realizar cálculos complejos en tiempo real. La combinación de estos métodos permitió asegurar que las conclusiones fueran robustas y estadísticamente válidas, considerando la heterogeneidad de los datos y ajustando correctamente las comparaciones múltiples (Sileshi, 2007; Vieira et al., 2018; Liu, Cripe, & Kim, 2010).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio del caudal del río Valles revelan una significativa variación en los caudales medidos en diferentes puntos del río. En particular, se observa una marcada disminución del caudal en ciertos sitios críticos, como Veladero, donde el caudal registrado fue 0.272 m³/s, en contraste con los caudales más elevados observados en sitios como S1 (4.280 m³/s) y S4 (4.480 m³/s). Esta disminución sugiere la existencia de factores específicos que impactan negativamente el flujo de agua en estos puntos, como se ilustra en la Tabla 1, donde se presentan los caudales calculados para cada sitio analizado, proporcionando una visión más detallada de las variaciones a lo largo del río.

Tabla 1.

Caudales calculados en los puntos de monitoreo establecidos del Río Valles.

Sitio	Caudal (m³/s)	Coordenadas UTM zona 14Q	Hora de muestreo	Fecha de muestreo
S1	4.28	458264 m E, 2497543 m N	11:10	18/04/2024
S2	4.3	466366 m E, 2489503 m N	12:57	18/04/2024
S3	4.76	472314 m E, 2473620 m N	13:59	18/04/2024
S4	4.48	477039 m E, 2956822 m N	15:26	18/04/2024

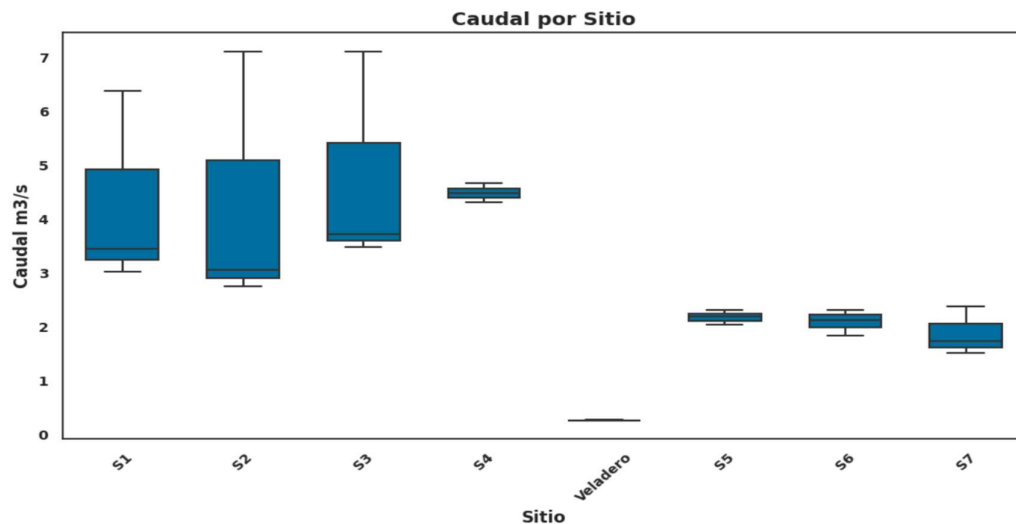
Veladero	0.272	479214 m E, 2447223 m N	16:00	18/04/2024
S5	2.18	483550 m E, 2444750 m N	17:00	18/04/2024
S6	2.1	493983 m E, 2434444 m N	09:33	19/04/2024
S7	1.88	498286 m E, 2429945 m N	11:40	19/04/2024
S8	SD	502662 m E, 2416875 m N	12:30	19/04/2024

Nota: La presente tabla detalla los caudales calculados y características importantes de muestreo. Fuente: Elaboración propia.

El análisis estadístico realizado, que incluyó una prueba de ANOVA (Figura 2), reveló diferencias significativas entre los caudales de las distintas estaciones ($F = 4.7363$, $p = 0.0048$), lo que indica que las variaciones observadas no son aleatorias, sino que responden a condiciones particulares de cada sitio. Estas diferencias fueron más notorias entre Veladero y las estaciones situadas aguas arriba (S1, S2, S3, y S4). Las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas confirmaron que los datos cumplen con los supuestos necesarios para el análisis, fortaleciendo la confiabilidad de los resultados obtenidos (Figura 2).

Figura 2.

Distribución de caudales del Río Valles.



Nota. Fuente propia.

Además, de la cantidad de agua, la calidad del agua emergió como un factor crucial que debe considerarse, especialmente en zonas donde la extracción y el uso del agua para fines agrícolas e industriales son intensivos. Estos factores afectan tanto la cantidad de agua disponible como su capacidad para sostener la biodiversidad acuática y los servicios ecosistémicos del río.

La marcada reducción del caudal en el sitio Veladero puede atribuirse a varios factores, entre ellos la extracción intensiva de agua para riego y posibles alteraciones morfológicas del río. La fragmentación institucional y la falta de coordinación efectiva entre diferentes niveles de gobierno y usuarios del agua son factores que, según Tortajada (2010), exacerbaban los problemas de gestión del agua y contribuyen al uso insostenible del recurso. Esta fragmentación es evidente en la cuenca del río Valles, donde múltiples actores compiten por un recurso limitado

sin una regulación adecuada.

Históricamente, los conflictos por el uso del agua en la región, como se describe en el estudio de Aguilar-Robledo (2014), han intensificado la competencia por el recurso durante periodos de escasez, exacerbando la desigualdad en su acceso y contribuyendo a la disminución del caudal en tramos específicos del río.

La reducción de los caudales, especialmente en sitios críticos como Veladero, tiene implicaciones directas para la biodiversidad acuática. Según Santacruz de León y Aguilar-Robledo (2009), la disminución en los caudales ecológicos puede comprometer la supervivencia de especies acuáticas que dependen de ciertos niveles de flujo para su hábitat. La comparación de los caudales observados en este estudio con los valores reportados por Santacruz de León y Aguilar-Robledo (2009) revela patrones preocupantes:

1. Estación Micos (Río Valles): En el estudio de Santacruz de León, la estación Micos reportó un caudal medio anual de 28.98 m³/s (1960-1975), mientras que, en nuestro estudio, el sitio más cercano a esta área mostró un caudal significativamente menor (2.180 m³/s), lo que refleja una disminución sostenida en los niveles de agua disponibles para mantener el ecosistema acuático.
2. Estación Santa Rosa: Similarmente, el caudal medio anual en Santa Rosa ha disminuido de 26.01 m³/s (1976-2000) a niveles que también muestran una reducción en nuestro estudio (2.100 m³/s), exacerbada por las extracciones y el cambio climático.

Estas disminuciones proyectadas en los caudales debido al cambio climático, como se detalla en el estudio sobre la variabilidad del régimen hidrológico en la región Huasteca, podrían agravar la situación. Las proyecciones indican una disminución significativa en los caudales medios y extremos, lo que afectaría tanto el suministro de agua como la biodiversidad en el río Valles (Salinas-Jiménez, 2020). La experiencia en la gestión del agua en contextos de sobreexplotación, como el caso de los COTAS en Guanajuato, resalta la importancia de implementar estrategias de autorregulación y gobernanza adaptativa para mitigar la sobreexplotación de los acuíferos y evitar problemas similares en la cuenca del río Valles (Wester, 2009). La implementación de técnicas de riego más eficientes, como el riego por goteo, y la adopción de sistemas de monitoreo en tiempo real son esenciales para mitigar la reducción del caudal en el río Valles. Estas medidas deben estar respaldadas por una gobernanza del agua más integrada y participativa, que considere tanto las necesidades ecológicas como las demandas socioeconómicas (Tortajada, 2010; Wester, 2009).

El concepto de caudal ecológico, como se describe en la guía del World Wildlife Fund (2011), es fundamental para la preservación de los ecosistemas acuáticos. Establecer caudales mínimos que garanticen la salud ecológica del río es crucial para preservar la biodiversidad y asegurar la provisión de servicios ecosistémicos a largo plazo (WWF, 2011). Este enfoque debe ser complementado con políticas de gestión que consideren tanto la cantidad como la calidad del agua, como se menciona en el estudio de Santacruz de León y Aguilar-Robledo (2009). Las políticas públicas deben integrar los hallazgos de este y otros estudios para abordar la sobreexplotación de los recursos hídricos en la cuenca del río Valles. La implementación de regulaciones más estrictas sobre la extracción de agua, combinada con incentivos para el uso eficiente del agua, puede contribuir a la sostenibilidad del recurso. Además, es crucial mejorar la instrumentación hidrométrica en la región para obtener datos más precisos y confiables que informen la gestión del agua (Tortajada, 2010).

La experiencia en otras regiones, como la aplicación del método Tennant en el río Valles y en

las cuencas del Golfo de California, demuestra la efectividad de los caudales ecológicos como herramienta para la gestión sostenible de los recursos hídricos (Santacruz de León & Aguilar-Robledo, 2009; Salinas-Jiménez, 2020). Sin embargo, la falta de regulación adecuada y la fragmentación en la gobernanza continúan siendo obstáculos que deben superarse. Para enfrentar los desafíos específicos del río Valles, resulta crucial integrar soluciones innovadoras que han mostrado su eficacia en contextos similares. Una de las estrategias iniciales más importantes es la implementación de sistemas de monitoreo hidrométrico en tiempo real. Estas tecnologías avanzadas, que incluyen sensores remotos y plataformas de datos en la nube, permiten un seguimiento continuo del caudal y la calidad del agua, facilitando así una gestión hídrica más precisa y adaptativa. Un ejemplo exitoso de esta tecnología se encuentra en la cuenca del río Ofanto en Italia, donde el monitoreo integral ha mejorado significativamente la capacidad de respuesta ante eventos extremos como sequías e inundaciones, contribuyendo a la sostenibilidad de los recursos hídricos de la región (De Girolamo et al., 2022).

Complementando este enfoque, la adopción de técnicas de riego de alta eficiencia, como el riego por goteo, se presenta como una solución efectiva para reducir el consumo de agua en la agricultura sin comprometer la productividad. Un caso notable es el de la cuenca del río Indo en Pakistán, donde la implementación de estas tecnologías ha permitido aumentar la eficiencia en el uso del agua y mejorar la productividad agrícola, incluso en un contexto de escasez hídrica (Qureshi, 2018). Además, la gobernanza del agua participativa se erige como un componente crucial en la gestión sostenible del recurso. La experiencia en la cuenca del río Murray-Darling en Australia, demuestra que involucrar activamente a todos los usuarios del agua en el proceso de toma de decisiones puede reducir la sobreexplotación y mejorar la equidad en el acceso al recurso (Grafton et al., 2019). Este modelo de gobernanza adaptativa podría replicarse de manera efectiva en la cuenca del río Valles, mitigando así los impactos de la extracción intensiva y fortaleciendo la resiliencia hídrica de la región.

Finalmente, la integración de modelos de predicción hidrológica basados en inteligencia artificial (IA) ofrece una herramienta poderosa para anticipar los efectos del cambio climático y ajustar las estrategias de manejo del agua en consecuencia. Un ejemplo exitoso de esta tecnología se encuentra en la cuenca del río Narmada en India, donde el uso de modelos predictivos con IA ha permitido planificar políticas de gestión hídrica con gran precisión, reduciendo significativamente la vulnerabilidad de la cuenca ante variaciones extremas en el régimen de lluvias (Yadav et al., 2020).

CONCLUSIÓN

La investigación sobre el caudal del río Valles revela que la fragmentación institucional, la extracción intensiva de agua y los efectos adversos del cambio climático han provocado una disminución alarmante en los caudales, particularmente en zonas críticas como Veladero. Esta reducción no solo pone en peligro la biodiversidad acuática, sino que también compromete la seguridad hídrica de las comunidades locales y la viabilidad de las actividades económicas en la región. El estudio destaca la imperativa necesidad de implementar caudales ecológicos y fortalecer la gobernanza del agua para garantizar la resiliencia hídrica del río Valles. Es crucial que las políticas públicas sean más rigurosas y estén basadas en la evidencia científica, para mitigar los impactos del cambio climático y la sobreexplotación del recurso hídrico. Asimismo, se recomienda la adopción de tecnologías de riego más sostenibles y la mejora en la instrumentación hidrométrica para un monitoreo continuo y preciso de los caudales.

REFERENCIAS

- Vannote, R. L., Minshall, G. W., Cummins, K. W., Sedell, J. R., & Cushing, C. E. (1980). The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37(1), 130-137. <https://doi.org/10.1139/F80-017>
- Naiman, R. J., Bechtold, J. S., Drake, D. C., Latterell, J. J., O'Keefe, T. C., & Balian, E. V. (2005). Origins, patterns, and importance of heterogeneity in riparian systems. *Ecosystem function in heterogeneous landscapes*, 279-309.
- Santacruz de León, G., & Aguilar-Robledo, M. (2009). Estimación de los caudales ecológicos en el Río Valles con el método Tennant. *Hidrobiológica*, 19(1), 25-32.
- Villela, R. G., Chávez, J. S., Inclán, L. A. B., & Carro, M. M. (2018). El caudal ambiental en el manejo integrado de las cuencas: caso de estudio (río Verde, Oaxaca, México). *Aqua-LAC*, 10(1), 1-14.
- De León, G. S. (2012). Conflictos sociales por el uso del agua en la cuenca del río Valles, Huasteca, México (1900-1945). *Revista de El Colegio de San Luis*, 2(4), 100-129.
- Dávila-Ortiz, R., Algara-Siller, M., & Velázquez-Zapata, J. A. (2020). Variabilidad del impacto del cambio climático en el régimen hidrológico de dos cuencas de la región Huasteca. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 21(3).
- Pérez, E. G., & Paredes, F. (2007). Influencia de variables macroclimáticas sobre el régimen pluviométrico del Estado Cojedes, Venezuela. *Revista Ingeniería UC*, 14(3), 49-56.
- Alvizuri Tintaya, P. A., & Pacheco, P. (2015). El impacto del cambio climático en la salud humana en la Cuenca de los ríos Mauri y Desaguadero (Altiplano central boliviano). *Revista Ciencia y Cultura*, 19(34), 59-80.
- Martínez Bárcenas, A., & Orozco Medina, I. (2022). Metodología para evaluar la vulnerabilidad de sistemas hidrológicos ante los potenciales efectos del cambio climático. *Acta universitaria*, 32.
- Martínez Bárcenas, A., Herrera Fernández, M., & Orozco Medina, I. (2022). Evaluación de la incertidumbre asociada a las proyecciones de precipitación considerando el cambio climático en la cuenca del río Turbio de Guanajuato. *Acta universitaria*, 32.
- Wester, P., Hoogesteger, J., & Vincent, L. (2009, February). Local IWRM organizations for groundwater regulation: The experiences of the Aquifer Management Councils (COTAS) in Guanajuato, Mexico. In *Natural Resources Forum* (Vol. 33, No. 1, pp. 29-38). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.
- De León, G. S. (2012). Conflictos sociales por el uso del agua en la cuenca del río Valles, Huasteca, México (1900-1945). *Revista de El Colegio de San Luis*, 2(4), 100-129.
- Tortajada, C. (2013). Water governance: Some critical issues. In *Improving Water Policy and Governance* (pp. 169-179). Routledge.
- Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., ... & Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime. *BioScience*, 47(11), 769-784.
- Nava, L. F., Torres Bernardino, L., & Orozco, I. (2024). Crisis Water Management in Mexico. In *The Palgrave Encyclopedia of Sustainable Resources and Ecosystem Resilience* (pp. 1-21). Cham: Springer International Publishing.
- Honkanen-Chagoya, M. (2024). Tourism as a reason and as a justification for water extractivism in Mexico. *Limnology and Oceanography*, 55(5), 1807-2229.
- Huerta-Vergara, A. R., & Escolero, O. (2024). The role of citizen participation in advancing sustainable water solutions: The Mexico City case study. *Sustainable Cities and Society*, 101, 105104.
- Casado, C. M. M. (2020). Filosofía de la Ciencia del Cambio Climático: modelos, problemas e incertidumbres. *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*, 20(41), 201-234.
- Majdalani, S., Chazarin, J. P., & Moussa, R. (2019). A new water level measurement method

- combining infrared sensors and floats for applications on laboratory scale channel under unsteady flow regime. *Sensors*, 19(7), 1511.
- Eruola, A. O., Makinde, A. A., Eruola, G. A., & Ayoola, K. O. (2021). Assessment of the rainfall exceedance in Nigeria. *Nigerian Journal of Technology*, 40(4), 751-761.
- Liu, C., Cripe, T. P., & Kim, M. O. (2010). Statistical issues in longitudinal data analysis for treatment efficacy studies in the biomedical sciences. *Molecular Therapy*, 18(9), 1724-1730.
- Yadav, A. K., Chandola, V. K., Singh, A., & Singh, B. P. (2020). Rainfall-runoff modelling using artificial neural networks (ANNs) model. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(3), 127-135.
- Grafton, R. Q., Garrick, D., Manero, A., & Do, T. N. (2019). The water governance reform framework: Overview and applications to Australia, Mexico, Tanzania, USA and Vietnam. *Water*, 11(1), 137.
- Qureshi, A. S. (2018). Challenges and opportunities of groundwater management in Pakistan. *Groundwater of South Asia*, 735-757.
- De Girolamo, A. M., Barca, E., Leone, M., & Porto, A. L. (2022). Impact of long-term climate change on flow regime in a Mediterranean basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41, 101061.