

Análisis numérico de la infiltración de contaminantes en la cuenca del río Tula Numerical modelling of contaminant infiltration in the Tula river basin

C. Vega-Ortiz ^{a,b,*}, J. L. Larios-Ferrer ^a, J. C. Reyes-García ^a, M. Badillo-Maldonado ^a, G. Kuri-Mar ^a

^a Universidad Politécnica de la Energía, 42832, Tula de Allende, Hidalgo, México.
^b Energy and Geoscience Institute, University of Utah, 48108, Salt Lake City, Utah, USA.

Resumen

Este estudio aborda la infiltración de contaminantes hacia el subsuelo en los cauces naturales y canales de irrigación en la cuenca hidrológica del río Tula, transportados desde del sistema de drenaje profundo de la Ciudad de México y las plantas industriales en la región del Valle del Mezquital, en Hidalgo, México. Utilizando un conjunto de datos basados en registros históricos, recopilados de múltiples publicaciones, se implementaron simulaciones numéricas para analizar la dinámica de transporte y acumulación de contaminantes hacia el subsuelo, enfocado en la concentración metales pesados Pb, As, Hg y Cd, con un enfoque particular en las implicaciones para la agricultura y en los acuíferos de consumo humano. Los resultados preliminares indican distribuciones significativas de contaminación que afectan directamente a población que radica en las zonas aledañas a las áreas de riego agrícola, destacando la necesidad urgente de estrategias de mitigación y políticas más robustas para proteger los recursos hídricos.

Palabras Clave: Contaminación hidrológica, Río Tula, Metales pesados, Simulación numérica, Transporte de masa.

Abstract

This study addresses the infiltration of contaminants into the subsurface in the natural waterways and irrigation canals of the Tula River Basin, transported from the deep drainage system of Mexico City and industrial plants in the Valle del Mezquital region in Hidalgo, Mexico. Using a dataset based on historical records collected from multiple publications, numerical simulations were implemented to analyze the dynamics of contaminant transport and accumulation into the subsurface, focusing on the concentration of heavy metals Pb, As, Hg, and Cd. The study pays particular attention to the implications for agriculture and human consumption aquifers. Preliminary results indicate significant distributions of contamination directly affecting the population residing in areas adjacent to agricultural irrigation zones, highlighting the urgent need for mitigation strategies and more robust policies to protect water resources.

Keywords: Hydrological contamination, Tula river, Heavy metals, Numerical simulation, Mass transport.

1. Introducción

El río Tula, situado en el estado de Hidalgo, México, enfrenta una crisis ambiental significativa debido a la contaminación hidrológica que afecta sus aguas. Este problema se ha intensificado en las últimas décadas debido al crecimiento urbano e industrial en la región, particularmente por las descargas de aguas residuales provenientes del sistema de drenaje profundo de la Ciudad de México (SACM, 2013). Estas descargas contienen una mezcla compleja de contaminantes, incluyendo metales pesados como plomo (Pb), arsénico (As), mercurio (Hg) y cadmio (Cd), así como nutrientes y compuestos orgánicos. La presencia de estos contaminantes no solo degrada la calidad del agua del río, sino

que también representa una amenaza directa para la salud de las comunidades locales que dependen del río para actividades agrícolas y como fuente de agua potable (SSH, 2016; Torres Bernardino, 2017).

La infiltración de contaminantes en el subsuelo a través de los cauces naturales y los canales de irrigación agrava la situación. Los acuíferos de la región, que son vitales para el suministro de agua potable, están en riesgo de contaminación debido a la movilidad de estos contaminantes. Además, las prácticas agrícolas que utilizan agua del río Tula para riego contribuyen a la diseminación de metales pesados y otros compuestos tóxicos en el suelo, lo cual puede ser absorbido por los cultivos. Esta contaminación tiene el potencial de entrar en la cadena alimentaria, poniendo en peligro la salud

*Autor para la correspondencia: carlos.vega@upenergia.edu.mx

Correo electrónico: carlos.vega@upenergia.edu.mx (Carlos Vega-Ortiz), leonel.larios@upenergia.edu.mx (José Leonel Larios-Ferrer), juan.reyes@upenergia.edu.mx (Juan Carlos Reyes-García), martin.badillo@upenergia.edu.mx (Martin Badillo-Maldonado), gonzalo.kuri@upenergia.edu.mx (Gonzalo Kuri-Mar).

humana y animal. La exposición prolongada a metales pesados se asocia con una serie de problemas de salud (SSMex, 1998), incluyendo enfermedades renales, daños neurológicos y trastornos del desarrollo, lo que subraya la gravedad del problema (OCDE, 2015).

1.1. El acuífero del Valle del Mezquital

El Valle del Mezquital (VDM) se localiza en la porción sureste del Estado de Hidalgo y se extiende hacia una parte del Estado de México, cubriendo una superficie de 2,714 kilómetros cuadrados. Este acuífero es de vital importancia para la región, ya que abastece de agua a diversas actividades humanas y agrícolas. En el Estado de Hidalgo, abarca totalmente a los municipios de Atotonilco de Tula, Atitalaquia, Tlaxcoapan, Tezontepec de Aldama y Tlahuelilpan, donde la agricultura intensiva y las industrias locales dependen en gran medida de este recurso hídrico (INEGI, 2023). Asimismo, en el Estado de México, incluye completamente a los municipios de Apaxco y Soyaniquilpan de Juárez, que también utilizan el agua del acuífero para el riego y consumo humano, subrayando la relevancia del acuífero para la sostenibilidad y el desarrollo económico de la región.

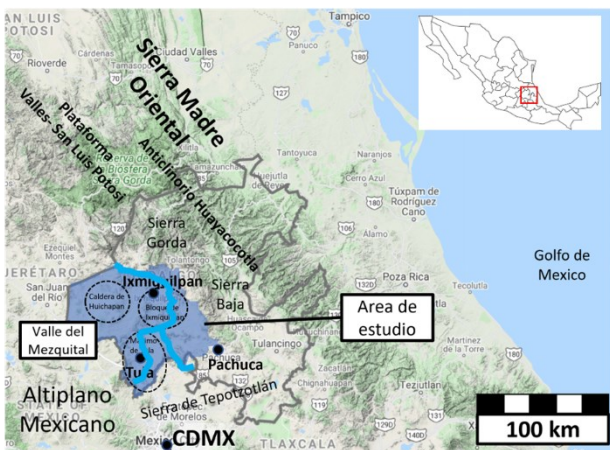


Figura 1: Ubicación del Valle del Mezquital, Hidalgo.

Además de cubrir completamente varios municipios, el acuífero Valle del Mezquital se extiende parcialmente a una serie de otros municipios, tanto en Hidalgo como en el Estado de México. En Hidalgo, afecta a los municipios de Chilcuautla, Alfajayucan, Chapantongo, Tepetitlán, Tula de Allende, Jiquipilco, Tepeji del Río de Ocampo, Ajacuba, Tetepango, Francisco I. Madero, Mixquiahuala de Juárez y Progreso de Obregón. Cada uno de estos municipios se beneficia del acuífero, utilizando el agua para diversas aplicaciones, incluyendo el riego de cultivos, abastecimiento de agua potable, y actividades industriales. La parcialidad de la cobertura implica que, en algunos casos, solo ciertas zonas dentro de estos municipios tienen acceso directo al agua del acuífero, lo que puede generar desafíos en la distribución y manejo del recurso, especialmente en épocas de sequía o de alta demanda.

En el Estado de México, el acuífero también se extiende parcialmente a los municipios de Villa del Carbón, Chapa de Mota, Hueyapoxtla y Jilotepec.

1.2. Clima y fisiografía

El clima varía entre semiárido y templado subhúmedo, influenciado por la topografía y la ubicación geográfica. En la porción norte y noreste, el clima es semiárido, caracterizado por temperaturas cálidas y bajos niveles de humedad, mientras que, en el centro y suroeste, el clima se torna templado y subhúmedo, con mayores contenidos de humedad. Ambos climas presentan un régimen de lluvias en verano, concentradas entre los meses de junio y septiembre. La temperatura media anual es de 16 grados centígrados en el noreste, descendiendo a una mínima media de 8 grados centígrados en las elevaciones más altas del suroeste. La precipitación media anual en el acuífero es de 600 milímetros, alcanzando un máximo de 1,200 milímetros en el suroeste y un mínimo de 500 milímetros en las zonas más extensas del valle.

El VDM se encuentra en la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico, que en esta región se caracteriza por planicies construccionales escalonadas y valles fluviales, aluviales y lacustres, poco disectados. La zona de la cuenca del río Tula tiene una ligera pendiente hacia el norte y una elevación aproximada de 1,900 metros sobre el nivel del mar.

En el territorio que ocupa el sector SO del VDM se distinguen dos subprovincias: la Subprovincia Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo, y la Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac. La Subprovincia Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo se encuentra en la porción norte y oeste del acuífero y está formada por montañas construidas a partir de secuencias marinas detríticas y calcáreas plegadas, con orientación casi norte-sur, separadas por valles aluviales y llanuras correspondientes a cuencas lacustres. Por otro lado, la Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac, ubicada en la porción sursureste, se caracteriza por significativos espesores de rocas ígneas volcánicas, abundantes lavas y material piroclástico, características distintivas del Eje Neovolcánico.

La superficie del VDM se divide en tres unidades geomorfológicas: el valle, las sierras volcánicas y las sierras calcáreas. La geomorfología del valle es una región plana con una ligera pendiente hacia el norte que se extiende por 2,000 kilómetros cuadrados, a una altitud promedio de 1,840 metros sobre el nivel del mar. Este valle está disectado en su porción sur por los ríos El Salto y Salado, afluentes del Río Tula, que fluyen de sureste a noroeste para incorporarse al Río Moctezuma fuera del área del VDM. En esta región se localiza el Distrito de Riego 003 Tula, que utiliza aguas residuales procedentes de la Zona Metropolitana del Valle de México, distribuidas a través de una extensa red de canales para irrigar la planicie (Chaussard et al., 2021). Las sierras volcánicas, constituidas por rocas ígneas volcánicas como andesitas y basaltos, forman parteaguas importantes y presentan alturas significativas, alcanzando hasta 3,000 metros sobre el nivel del mar en la sierra entre Tepeji del Río y Jilotepec. En contraste, al oeste de la Ciudad de Tula y alrededor de Mixquiahuala, existen sierras volcánicas redondeadas que se elevan hasta 200 metros sobre el valle, mientras que, en el oriente del Valle del Mezquital, elevaciones formadas por rocas volcánicas limitan el relleno granular del acuífero del VDM, afectando su capacidad de recarga y almacenamiento de agua.

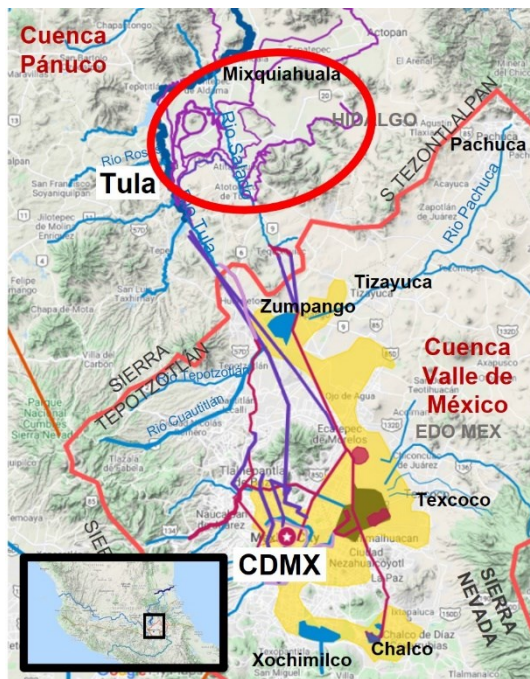


Figura 2: Red de drenaje profundo de la Ciudad de México y la comunicación hidrológica a la cuenca del río Tula.

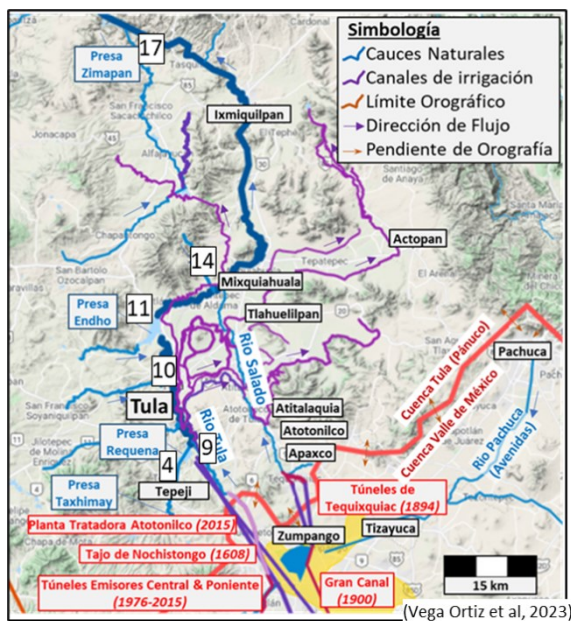


Figura 3: Distribución de canales de irrigación de los distritos de riego 003 Tula, 100 de Alfajayucan y 112 de Ajacuba. Los números en cuadros son algunas de las estaciones de medición utilizadas por (Rubio-Franchini et al., 2016).

2. Antecedentes

La comunicación entre el Valle de México y la cuenca del río Tula se establece a través del sistema de drenaje profundo, que juega un papel crucial en la gestión de aguas residuales de la megalópolis. Este sistema transporta una parte significativa de las aguas residuales de la Ciudad de México hacia la cuenca del río Tula, afectando directamente la calidad del agua en esta región. Las descargas provenientes del Valle de México, junto con las emisiones industriales locales y los desechos domésticos, contribuyen a la contaminación de los cuerpos hídricos en el Valle del Mezquital, subrayando la interdependencia y los desafíos compartidos en la gestión de recursos hídricos entre estas dos importantes regiones del

país, como se muestra en las Figuras 2 y 3 (Lopez Flores, 2017).

Otros datos presentados en este estudio han sido recopilados y sintetizados a partir de diversas fuentes y trabajos de investigación de múltiples autores. Esta información incluye análisis geológicos, hidrológicos y climatológicos previamente publicados, que proporcionan una base sólida para la comprensión del acuífero Valle del Mezquital.

2.1. Estudios preliminares

Rubio-Franchini et al., (2016) realizó un extenso estudio a lo largo del cauce principal del río Tula utilizando 32 estaciones de medición, con los resultados como se muestran en la Figura 4, que muestra los valores de As, Cd y Pb en la columna de agua en las 32 estaciones de muestreo investigadas. El metaloide As fue el más abundante de los tres elementos en la columna de agua, con valores que oscilan entre 0.3 y 4.8 $\mu\text{g/L}$, seguido por Pb y luego Cd. También se detectaron cobre y zinc en los elutriados y sedimentos, pero no en la columna de agua de las estaciones de muestreo. El cobre en los elutriados varió de 0.01 a 0.984 mg/L y no se detectó en tres estaciones de muestreo. El cobre en los sedimentos varió de 0.01 a 150.82 mg/kg y se detectó en todas las estaciones de muestreo. El zinc en los elutriados varió de 0.021 a 5.392 mg/L y no se detectó en dos estaciones de muestreo. El zinc en los sedimentos varió de 7.927 a 149.098 mg/kg y se detectó en todas las estaciones de muestreo. Sin embargo, nunca se detectaron acumulaciones de ambos metales en los organismos zooplanctónicos analizados.

Los valores de As en los sedimentos alcanzaron hasta 480 $\mu\text{g/kg}$ (Figura 4), pero solo una pequeña fracción es bio-disponible, ya que el As en los elutriados solo alcanza hasta menos de 100 $\mu\text{g/L}$. Los valores de Cd en los sedimentos alcanzaron hasta 500 $\mu\text{g/kg}$, mientras que el Cd en los elutriados solo alcanza hasta menos de 275 $\mu\text{g/L}$. Estos datos indican que, aunque los niveles de estos metales en los sedimentos pueden ser altos, la cantidad bio-disponible en el agua es significativamente menor, lo que podría influir en la biodisponibilidad para los organismos acuáticos.

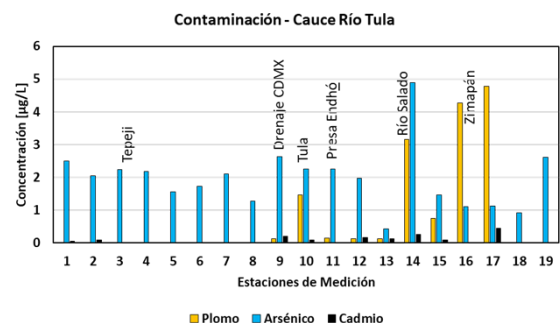


Figura 4: Mediciones realizadas por Rubio-Franchini et al. (2016) indicando el contenido de plomo, arsénico y cadmio en sedimentos de la rivera del río Tula (Adaptado de Rubio-Franchini et al., 2016).

Los valores de Pb en los sedimentos alcanzaron hasta 8 $\mu\text{g/kg}$, pero solo una pequeña fracción es bio-disponible, ya que el Pb en los elutriados solo alcanza hasta menos de 3 $\mu\text{g/L}$. Esta baja biodisponibilidad sugiere que, aunque el Pb está presente en el medio ambiente, su potencial impacto biológico puede estar limitado debido a la baja concentración en formas bio-disponibles.

Otro estudio realizado por Guédron et al. (2014) incluyó la medición de contaminantes en sedimentos aledaños al río Tula, en pozos de agua potable y en el sistema de drenaje, para comparar después el tipo de fuente de la muestra.

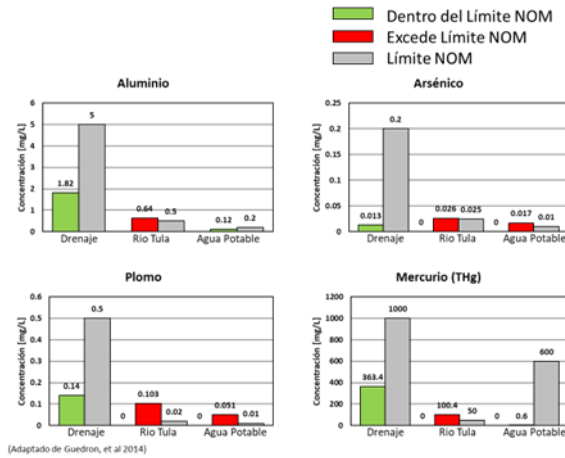


Figura 5: Mediciones realizadas por Guédron et al. (2016) indicando el contenido de aluminio, arsénico y plomo y mercurio en diferentes fuentes en el VDM (Adaptado de Guédron et al., 2016).

Guédron et al. (2014) midió altas concentraciones de metales, incluyendo metilmercurio (3.8 ± 2.5 ng l-1) y plomo (0.16 ± 0.05 mg l-1) en canales de aguas residuales anóxicas. Río abajo, las concentraciones de polimetale disueltos y particulados (Hg, Pb, Cr, entre otros) disminuyeron en factores de 0 a 1,000 en el río Tula, que recibe una mezcla de agua dulce y aguas residuales, debido a la dilución y oxidación del agua superficial, y a la disminución de la concentración de contaminantes en las aguas residuales que riegan los suelos aguas abajo. Sin embargo, las concentraciones disueltas y particuladas de metilmercurio (0.06 a 0.33 ng l-1 y 1.6 a 4.5 μ g kg-1, respectivamente) permanecieron elevadas en comparación con otros sistemas hidrológicos naturales.

El monitoreo de un evento de riego y la distribución de metales en un perfil de suelo irrigado durante más de 80 años mostraron que los metales se retuvieron en la capa labrada de drenaje. Las condiciones óxicas y el pH ligeramente ácido (~ 6.5) en esta capa fueron favorables para la adsorción de metales y la coprecipitación con elementos sensibles a la oxidación-reducción (Fe, Mn) y, posiblemente, para la desmetilación del mercurio. En el río Tula aguas abajo y en las aguas subterráneas, casi todas las concentraciones metálicas permanecieron por debajo de los límites establecidos por las directrices. No obstante, las concentraciones disueltas de As y Pb se mantuvieron dos a cinco veces por encima de los umbrales para el agua potable, destacando un posible riesgo para la salud de aproximadamente 500,000 personas que utilizan las aguas subterráneas como suministro de agua.

3. Método

La simulación numérica del transporte de fluidos en este modelo se realizó con la implementación de las ecuaciones de balance de materia en la plataforma MATLAB, utilizando el método numérico de Newton-Raphson y la técnica de IMPES

(implícito-explicito) (Anderson et al., 2016; Ertekin et al., 2001), implementadas en una matriz 2-dimensional (2D) de 70 x 70 celdas. Se asumen las siguientes condiciones: a) todos los procesos son isotérmicos, b) los fluidos son incompresibles y no reactivos, c) el subsuelo se considera como un sistema empacado de alta permeabilidad con partículas esféricas, y d) la permeabilidad y porosidad de la zona del lecho de los cauces naturales hidrológicos se reducen a una fracción de los valores originales (Chapra, 2015; Dwivedi & Upadhyay, 1977).

Una celda de cuadrícula 3D definida en un sistema de coordenadas cartesianas es el elemento de volumen de control a través del cual se cuantifica el movimiento del fluido. Este bloque individual también tiene propiedades físicas específicas como se describe en la Figura 6.

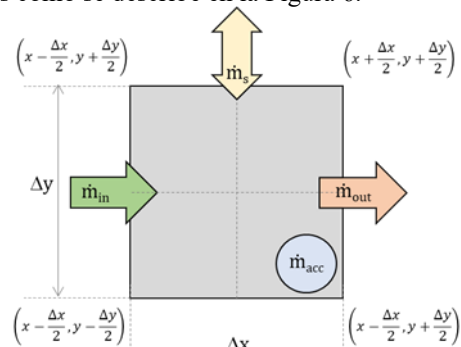


Figura 6: Descripción del balance de masa sobre el volumen de control.

Los componentes de la transferencia de masa entre bloques son flujo entrante, flujo saliente, acumulación y producción.

$$(m_i - m_o) + m_s = m_a \quad (1)$$

El flujo entrante y el flujo saliente son la transferencia de masa que ocurre entre celdas adyacentes, debido al diferencial de presión presente en cada paso de tiempo. El flujo de masa de extracción (sink) o fuente (source) es la cantidad de masa que se añade o se retira del sistema; en simulaciones de reservorios o acuíferos, el punto de extracción o fuente representa los pozos de extracción o bien las recargas del acuífero como lluvia, pero en el caso del simulador de transporte en el caudal del río, la extracción y la fuente será únicamente el fluido que se recibe en el caudal del río. Finalmente, la acumulación es la cantidad de masa que se almacena en el bloque durante ese paso de tiempo específico.

El propósito del simulador es cuantificar el efecto del transporte de masa por la presión hidrostática a lo largo del cauce en cuestión y calcular cómo se propagará a lo largo de la cuadrícula en un tiempo definido, considerando las propiedades petrofísicas de la roca simulada.

Aplicando el concepto de diferenciación cuando la dimensión del volumen de control y el incremento de tiempo se acercan a cero, el balance de materiales resulta en la Ecuación Diferencial Parcial (EDP).

$$-\frac{\partial}{\partial x}(\rho u_x A_x) \Delta x - \frac{\partial}{\partial y}(\rho u_y A_y) \Delta y + \frac{q_m}{\alpha_c} = \frac{V_b}{\alpha_c} \frac{\partial}{\partial x}(\phi \rho), \quad (2)$$

donde el término $-\partial/\partial x(\rho u_x A_x) \Delta x$ representa el flujo de masa en la dirección x y ρ es la densidad del fluido, u_x es la componente de la velocidad del fluido en la dirección x , A_x es el área a través de la cual el fluido fluye en la dirección x , y Δx es el incremento en la dirección x . El término q_m/α_c

representa una fuente o sumidero de masa en el sistema, donde q_m es el flujo de masa, y el término $V_b/\alpha_c \partial/\partial x(\phi \cdot \rho)$ representa el efecto del volumen poroso en el almacenamiento y transporte de masa, donde V_b es el volumen de porosidad del medio, ϕ es la porosidad del medio, ρ es la densidad del fluido, y α_c es el coeficiente de acumulación que puede representar la capacidad del medio para almacenar masa y está escrito en términos de la compresibilidad, C_f y porosidad de la roca, $\phi^{t+1} = \phi_o(1 + C_f(P_o - P^{t+1}))$ (Athy, 1930; Ertekin et al., 2001; Tran et al., 2009).

Tomando las definiciones de la ley de Darcy para el flujo a través de medios porosos, la velocidad superficial en la dirección i se puede expresar como:

$$u_i = -\beta_c \frac{k_i}{\mu} \frac{\partial \phi}{\partial i} \quad (3)$$

donde i indica la fase (agua del acuífero o agua contaminada), K_x es el promedio aritmético de la permeabilidad entre celdas de cuadrícula adyacentes, A_x es el área de flujo, K_{rl} es la permeabilidad relativa, μ_i es la viscosidad del fluido y B_l es el factor de volumen de formación (dado que todos los cálculos ocurren en el subsuelo, se puede considerar el factor de volumen de formación como $B=1$). Combinando (2) y (3), se obtiene la ecuación gobernante en 2D para aplicaciones de ingeniería de reservorios:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\beta_c K_x A_x \frac{K_{rl}}{\mu_i B_l} \left(\frac{\partial P_l}{\partial x} \right) \right] \Delta x + \frac{\partial}{\partial y} \left[\beta_c K_y A_y \frac{K_{rl}}{\mu_i B_l} \left(\frac{\partial P_l}{\partial y} \right) \right] \Delta y = \frac{V_b}{\alpha_c} \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{S_l}{B_l} \right) - q_{lc} \quad (4)$$

Los valores utilizados en la solución de las ecuaciones son porosidad inicial densidad $\rho = 2100 \text{ kg/m}^3$, $\phi_o = 0.4 \%$, compresibilidad $C_f = 7.25 \times 10^{-10} [1/\text{Pa}]$, presión inicial $P_o = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$, permeabilidad $K = 9.869233 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, y viscosidad $= 0.9 \text{ cP}$.

Es importante aclarar que el modelo implementado en su programación actual carece de modelado de transporte de masa por difusión, $J = -\rho \cdot D \cdot dC/dx$ (Bird et al., 2006), que pueda cuantificar el transporte de cada especie dentro de la simulación, únicamente se calcula el transporte convectivo.

4. Resultados

4.1. Filtración de agua contaminada en los cauces principales

La estimación de contaminantes se realiza con el cálculo de saturación de agua contaminada en una matriz que replica la trayectoria de los principales cauces en la región, específicamente el río Tula y su afluente principal, el río Salado. Este enfoque considera que el río transporta exclusivamente agua contaminada, sin tomar en cuenta la posible acumulación de sedimentos a lo largo del sistema hidrológico, como ocurre en la presa Requena y la Presa Endhó, detalladas en la Figura 7 del estudio.

Este método de modelado permite no solo estimar la propagación de contaminantes a lo largo de los cauces fluviales estudiados, sino también evaluar la posible influencia de infraestructuras como las presas mencionadas, que podrían actuar como puntos de acumulación o filtración en el sistema hídrico. Estos hallazgos son fundamentales para comprender la dinámica de contaminación en esta área específica y para orientar estrategias de gestión ambiental que

mitiguen los efectos adversos sobre los recursos hídricos locales.

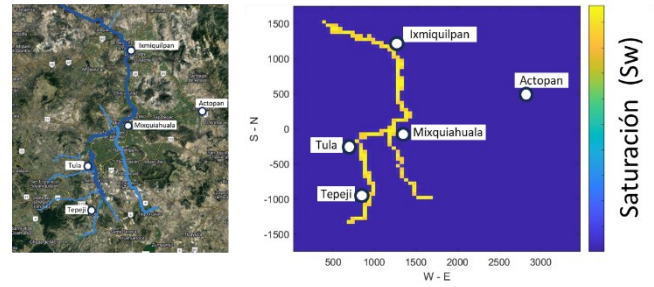


Figura 7: Mapa de los principales cauces río Salado y río Tula en vista de imagen y la trayectoria en el modelo 2-D.

Los resultados obtenidos revelan la distribución de la filtración de agua contaminada a lo largo del tiempo, representados en las Figuras 8a, 8b y 8c para intervalos de 5, 10 y 15 años, respectivamente. Estos gráficos ilustran cómo se proyecta la dispersión de contaminantes a medida que transcurre el tiempo, ofreciendo una visualización clara de la evolución del impacto potencial en el entorno acuático regional.

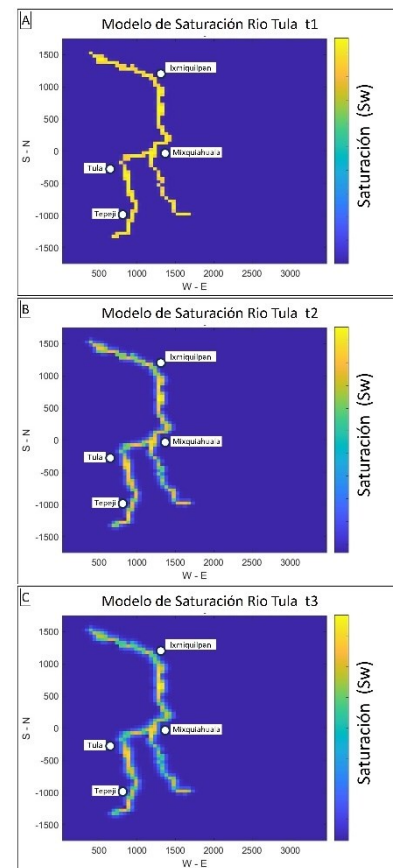


Figura 8: Proyección de filtración de agua contaminada considerando solo los cauces principales en la cuenca del río Tula a) 5, b) 10 y c) 15 años.

4.2. Filtración de agua contaminada en los cauces principales y canales de irrigación agrícola.

Dado que los canales de irrigación agrícola transportan agua negra desde los afluentes del río Tula hasta las zonas de irrigación en el Valle del Mezquital, se estudia el transporte

de agua negra a través de los canales de irrigación agrícola desde los afluentes del río Tula hasta las extensas áreas de cultivo. Este estudio proyecta la contaminación considerando las rutas seguidas por los canales y las zonas agrícolas donde el agua contaminada se deposita directamente sobre el terreno. Se aplican factores específicos para estimar la permeabilidad de los canales revestidos de cemento, asumiendo una menor infiltración debido a posibles juntas o fisuras en las láminas de concreto. Además, se considera una reducción en el caudal de flujo de agua de riego, siendo de 0.5 para los canales principales y de 0.1 para las zanjas o canales menores que riegan las parcelas.

Para la precisa delimitación y análisis de las trayectorias de los canales de irrigación, se utilizó la plataforma Google Maps para geo-referenciar digitalmente las ubicaciones. Este método asegura una alta precisión en la cartografía de las áreas de estudio, tal como se ilustra en la Figura 9 del artículo. La digitalización permite no solo visualizar detalladamente los cursos de agua y su relación con las áreas de cultivo, sino también facilita la integración de datos espaciales para análisis más profundos de la distribución y el impacto de la contaminación a lo largo de estas vías acuáticas.

Estos hallazgos son necesarios para comprender la dinámica de la contaminación por aguas residuales en el valle del Mezquital, ya que tradicionalmente otros estudios previos se han centrado únicamente en el cauce principal del río Tula, omitiendo el impacto de la distribución de contaminantes hacia los centros urbanos.

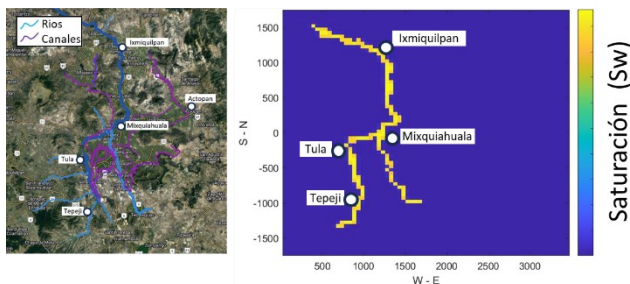


Figura 9: Mapa de los principales cauces río Salado y río Tula en vista de imagen y la trayectoria en el modelo 2-D.

La proyección de la infiltración de agua contaminada, representada en las Figuras 10a, 10b y 10c para periodos de 5, 10 y 15 años respectivamente, constituye un primer paso crucial en la evaluación del impacto ambiental en el Valle del Mezquital. A pesar de las limitaciones en la resolución de la matriz y la capacidad computacional, estos modelos proporcionan una visión general del alcance del problema, especialmente en áreas densamente pobladas como Atitalaquia, Mixquiahuala, Atotonilco, Ajacuba, y sus alrededores como Alfajayucan e Ixmiquilpan.

Para validar estas proyecciones, es imprescindible realizar mediciones directas de contaminantes en diversas estaciones a lo largo de la extensión total de los distritos de riego. Estas mediciones no solo permitirán corroborar los resultados modelados, sino también evaluar de manera precisa el impacto en distintos contextos, incluyendo zonas agrícolas, industriales, urbanas y acuíferos utilizados para consumo humano en la región. Este enfoque integrado es esencial para comprender la distribución espacial de la contaminación y para formular estrategias efectivas de gestión y mitigación. Además, se requiere una monitorización continua y a largo plazo para captar las variaciones estacionales y anuales en la

contaminación, así como para evaluar la efectividad de medidas correctivas implementadas. La combinación de datos modelados y mediciones empíricas constituye una metodología robusta para abordar los desafíos ambientales complejos en el Valle del Mezquital.

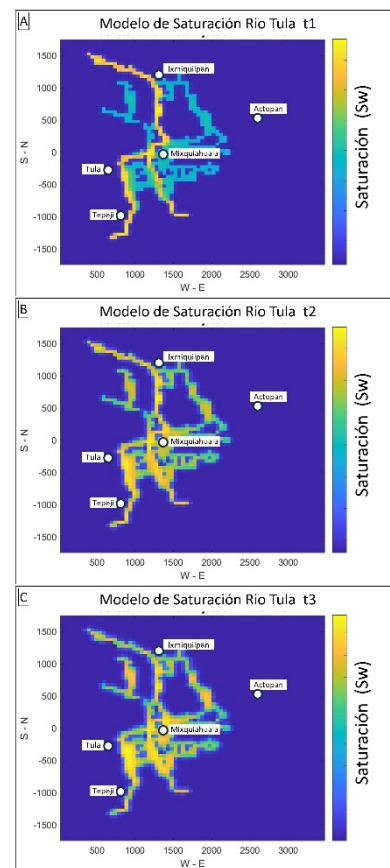


Figura 10: Distribución de filtración de agua contaminada incluyendo los canales de irrigación agrícola.

5. Discusión

La problemática de la emisión de contaminantes en el Valle del Mezquital tiene causas específicas que incluyen la descarga del sistema de drenaje profundo de la Ciudad de México, las emisiones industriales locales y los desechos domésticos vertidos sin una regulación rigurosa. Estos factores contribuyen significativamente a la contaminación del agua en esta región sensible y destacan la necesidad de medidas efectivas de control y gestión ambiental.

En cuanto al rol de las plantas tratadoras de aguas residuales, un informe del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM, 2013) detalla la capacidad de tratamiento del sistema en la zona metropolitana, que abarca emisores superficiales y túneles, con una capacidad total de 695 m³/s. Además, se especifica la capacidad de tratamiento de aguas negras en las plantas de Atotonilco, Zumpango, Berriozabal, Caracol y el Vaso el Cristo, sumando un total de 35 m³/s, como se muestra en la Tabla 1 y Figura 11. Esta disparidad entre la capacidad de descarga y la capacidad de tratamiento resalta la necesidad crítica de aumentar la capacidad instalada de tratamiento de aguas negras en aproximadamente veinte veces para balancear adecuadamente el volumen de descarga con la capacidad de tratamiento disponible (CNA, 2008; De Nova & Luna Millan, 2014).

Tabla 1: Capacidad instalada de drenaje y de plantas tratadoras.

Instalaciones	Capacidad [m ³ /s]
EMISIONES (DRENAJE)	
Emisor Central	220
Interceptor Central	90
Interceptor Centro-Centro	90
Interceptor Oriente	85
Interceptor Centro-Oriente	40
Interceptor del Poniente	25
Interceptor Iztapalapa	20
Interceptor Obrero Mundial	20
Interceptor Oriente Sur	85
Canal Nacional-Chalco Chalco	20
Total Emisiones	695
PLANTAS TRATADORAS	
PT Atotonilco	23
PT Zumpango	2
PT Berriozabal	2
PT Caracol	4
PT Vaso El Cristo	4
Total Plantas Tratadoras	35

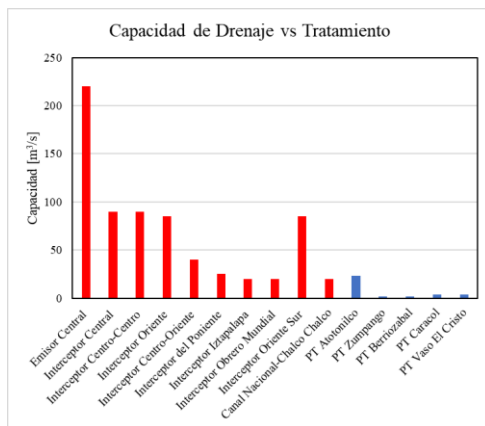


Figura 11: Capacidad instalada de drenaje y de plantas tratadoras de agua negra en el sistema de drenaje profundo de la zona metropolitana.

Estos datos técnicos subrayan la importancia de fortalecer la infraestructura de tratamiento de aguas residuales para cumplir con estándares ambientales más estrictos y mejorar la calidad del agua en el Valle del Mezquital. La expansión significativa de esta capacidad no solo es crucial para mitigar los impactos negativos sobre la salud pública y los ecosistemas acuáticos locales, sino también para asegurar un manejo sostenible de los recursos hídricos en la región frente a los desafíos crecientes de la contaminación urbana e industrial.

6. Conclusiones

El estudio de simulación numérica de la filtración de contaminantes en el Valle del Mezquital revela la urgente necesidad de implementar un sistema continuo de monitoreo y muestreo de contaminantes para gestionar eficazmente la calidad del agua en la región. Los resultados obtenidos subrayan la complejidad y la extensión de la contaminación, identificando áreas críticas donde las concentraciones de contaminantes son significativamente altas. Este hallazgo resalta la importancia de contar con datos precisos y actualizados para comprender mejor la distribución espacial y temporal de la contaminación, así como para evaluar el

impacto en los ecosistemas acuáticos y en la salud pública (SEMARNAT-INECC, 2018).

La implementación de un sistema de monitoreo continuo permitiría detectar patrones de contaminación en tiempo real, facilitando una respuesta rápida y efectiva ante eventos de contaminación agudos o cambios ambientales significativos. Esto incluye la capacidad de identificar fuentes específicas de contaminación, como descargas industriales no reguladas o episodios de vertidos ilegales, que podrían pasar desapercibidos con métodos de monitoreo menos frecuentes.

Adicionalmente, el muestreo regular y sistemático de contaminantes en diferentes puntos del Valle del Mezquital es esencial para evaluar la eficacia de las medidas de control y mitigación implementadas. Este enfoque proporcionaría datos robustos para evaluar tendencias a largo plazo en la calidad del agua y para ajustar estrategias de gestión ambiental de manera proactiva. Asimismo, permitiría verificar el cumplimiento de normativas ambientales y la efectividad de las inversiones en infraestructura de tratamiento de aguas residuales.

La implementación de un sistema integral de monitoreo continuo y muestreo de contaminantes es necesaria para la protección ambiental del Valle del Mezquital, así como también es determinante para asegurar la salud pública y la sostenibilidad de los recursos hídricos en la región. Este enfoque estratégico es esencial para enfrentar los desafíos crecientes de la contaminación y para promover un desarrollo ambientalmente responsable en el área afectada.

Agradecimientos

Los autores de este estudio agradecen la Rectoría de la Universidad Politécnica de la Energía por promover y facilitar las actividades de la academia de investigación.

Referencias

- Anderson, D., Tannehill, J. C., & Pletcher, R. H. (2016). Computational fluid mechanics and heat transfer, Third edition. In CRC Press. Series in Computational and physical process in mechanics and thermal sciences (Third edit, pp. 1–740). CRC Press.
- Athy, L. F. (1930). Density, Porosity, and Compaction of Sedimentary Rocks1. AAPG Bulletin, 14(1), 1–24. <https://doi.org/10.1306/3D93289E-16B1-11D7-8645000102C1865D>
- Bird, R. B. (Robert B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (2006). Transport phenomena (2nd ed., p. 928). J. Wiley.
- Chapra, S. C. (2015). Numerical methods for engineers (R. P. Canale (ed.); Seventh ed). New York, NY : McGraw-Hill Education.
- Chaussard, E., Havazli, E., Fattahi, H., Cabral-Cano, E., & Solano-Rojas, D. (2021). Over a Century of Sinking in Mexico City: No Hope for Significant Elevation and Storage Capacity Recovery. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126(4). <https://doi.org/10.1029/2020JB020648>
- CNA, C. N. del A. (2008). Inventario Nacional de Obras de Protección contra Inundaciones en Cauces Naturales.
- De Nova, A. de J., & Luna Millan, H. (2014). SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD APLICADO EN LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2014/febrero/0709359/0709359.pdf>
- Dwivedi, P. N., & Upadhyay, S. N. (1977). Particle-Fluid Mass Transfer in Fixed and Fluidized Beds. Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development, 16(2), 157–165. <https://doi.org/10.1021/i260062a001>
- Ertekin, T., Abou-Kassem, J. H., & King, G. R. (2001). Basic Applied Reservoir Simulation (1st ed.). Society of Petroleum Engineers Textbook Series Vol 7.
- Guédrón, S., Duwig, C., Prado, B. L., Point, D., Flores, M. G., & Siebe, C.

- (2014). (Methyl)mercury, arsenic, and lead contamination of the world's largest wastewater irrigation system: The Mezquital valley (Hidalgo State-Mexico). *Water, Air, and Soil Pollution*, 225(8), 2045. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2045-3>
- INEGI. (2023). Cartografía geoestadística urbana y rural amezanada. Cierre de la Encuesta Intercensal 2015 (Hidalgo). Marco Geoestadístico. <https://www.inegi.org.mx/>
- Lopez Flores, R. A. (2017). Evolución de la Comisión Metropolitana de Drenaje del Valle de México. Sesión Especial Cooperación e Intercambio de experiencias en el Manejo de los Recursos Hídricos y la Adaptación al Cambio Climático. XVI World Water Congress. International Water Resources Association, 12. <https://www.riob.org/fr/file/288854/download?token=-qc2FkbV>
- OCDE. (2015). Estudios Territoriales de la OCDE, Valle de Mexico, Mexico. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264245174-en>
- Rubio-Franchini, I., López-Hernández, M., Ramos-Espinosa, M. G., & Rico-Martínez, R. (2016). Bioaccumulation of Metals Arsenic, Cadmium, and Lead in Zooplankton and Fishes from the Tula River Watershed, Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution*, 227(1), NA-NA. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2702-1>
- SACM. (2013). El gran reto del agua en la Ciudad de México. Pasado, Presente y Prospectivas de solución para una de las ciudades mas complejas del mundo. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2013/02/El-gran-reto-del-agua-en-la-Ciudad-de-Mexico.pdf>
- SEMARNAT-INECC. (2018). Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bial de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático MÉXICO. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/MEX_6aNC_Revisada_0.pdf
- SSH. (2016). Secretaria de Salud Hidalgo. Actualización del programa Sectorial de Salud 2011-2016. <http://transparencia.hidalgo.gob.mx/descargables/ENTIDADES/CESalud/6POA's/ProgramaSectorialdeSalud20112016.pdf>
- SSMex. (1998). Secretaria de Salud Mexico. La Situación de la Salud Hidalgo. <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/documentos/edo13.pdf>
- Torres Bernardino, L. (2017). La gestión del agua potable en la Ciudad de México: los retos hídricos de la CDMX: gobernanza y sustentabilidad. Instituto Nacional de Administración Pública, A.C., pp.194, 978-607-9026-70-7. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-02055413>
- Tran, D., Nghiem, L., & Buchanan, L. (2009). Aspects of coupling between petroleum reservoir flow and geomechanics. 43rd U.S. Rock Mechanics Symposium and 4th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium..

Apéndice 1

En este apéndice se muestran imágenes de algunos sitios y las condiciones del sistema de riego.

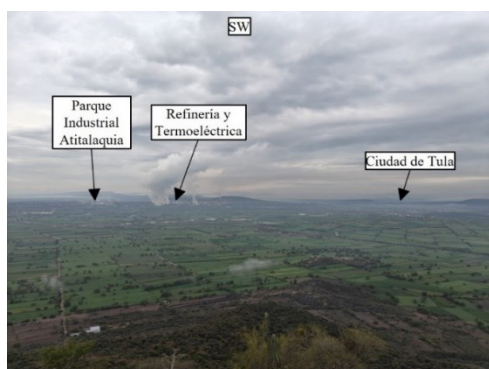


Figura A1. Imagen de una sección la extensión territorial del distrito de riego de Tula, que utiliza agua negra para irrigación. Imagen desde el Cerro Xicuco hacia el suroeste (SW) (Coordenadas Latitud: 20.1277 N, Longitud: -99.2970 W).



Figura A2. Canal expuesto de aguas negras en la comunidad de Presas, Hidalgo, con la característica espuma generada por la turbulencia y los químicos contenidos en el agua negra. (Coordenadas Latitud: 20.1290 N, Longitud: -99.2847 W).



Figura A3. Compuerta de control para suministro de agua desde el canal principal hacia los sembradíos. (Coordenadas Latitud: 20.1290 N, Longitud: -99.2847 W).



Figura A4. Compuertas de control hacia los sembradíos, se observa el fondo de concreto y los posibles puntos de fuga en las juntas y fisuras. (Coordenadas Latitud: 20.1290 N, Longitud: -99.2847 W).



Figura A5. Ejemplo del riego por inundación de las parcelas desde la red de canales. El agua negra fluye libremente hacia los sembradíos, inundando la superficie y depositando las partículas de contaminantes. (Coordenadas Latitud: 20.1290 N, Longitud: -99.2847 W).