

Presencia de Microcontaminantes Orgánicos en Aguas y Suelos Agrícolas Presence of Organic Micropollutants in Agricultural Waters and Soils

Amado Enrique Navarro-Frómata¹, José Luis Marrugo-Negrete² y
Josep María Bayona-Termens³

¹ Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros. Prol. Reforma 168, barrio de Santiago Mihucán. 74420 Izúcar de Matamoros, Puebla, México; (A.E.N.F.).

² Universidad de Córdoba. Cra. 6 No. 77-305. 230002 Montería, Córdoba, Colombia; (J.L.M.N.).

³ Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua. Carrer de Jordi Girona 18-26. 08034 Barcelona, España; (J.M.B.T.).

† Autor para correspondencia: navarro4899@gmail.com

RESUMEN

Al utilizar cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas se determinaron las concentraciones de microcontaminantes orgánicos (MCO) en agua de riego en 15 parcelas localizadas en el valle de Atlixco-Izúcar en Puebla. De manera similar, se determinaron las concentraciones de tales contaminantes en suelos regados con agua del río Sinú en la cuenca del río del mismo nombre en el departamento de Córdoba en Colombia. Tanto en las aguas de riego de México, como en los suelos de Colombia, las concentraciones de los MCO analizados superan por mucho los valores encontrados en matrices similares en entornos agrícolas de España, lo que indica la necesidad de atender el monitoreo y tratamiento adecuado de las aguas con las que se va a regar.

Palabras clave: *compuestos antrópicos, terrenos de cultivo, México, Colombia.*



Cita recomendada:

Navarro-Frómata, A. E., Marrugo-Negrete, J. L., & Bayona-Termens, J. M. (2024). Presencia de Microcontaminantes Orgánicos en Aguas y Suelos agrícolas. *Terra Latinoamericana*, 42, 1-12. e1798. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1798>

Recibido: 15 de agosto de 2023.

Aceptado: 5 de abril de 2024.

Artículo. Volumen 42.

Junio de 2024.

Editor de Sección:

Dr. Pablo Preciado Rangel

Editor Técnico:

Dr. Marco Antonio Camacho Escobar



Copyright: © 2024 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

SUMMARY

Using gas chromatography coupled with mass spectrometry, the concentrations of organic micropollutants (OMP) in irrigation water were determined in 15 plots located in the Atlixco-Izúcar Valley in Puebla, Mexico. Similarly, pollutant concentrations were determined in soils irrigated with water from the Sinú River in the river basin (same name) in the Department of Córdoba, Colombia. Both in Mexican irrigation waters Colombian soils, the OMP concentration analyzed far exceed the values found in similar matrices in agricultural environments in Spain. These results indicate the need to attend to monitoring and adequately treating water for irrigation.

Index words: *anthropic compounds, cropland, Mexico, Colombia.*

INTRODUCCIÓN

Los microcontaminantes orgánicos (MCO) abarcan un amplio espectro de sustancias que el hombre produce para satisfacer sus necesidades cotidianas, y que terminan en las aguas residuales domésticas e industriales. Esto abarca fármacos de uso humano o veterinario, productos del cuidado personal, tensioactivos y más recientemente los microplásticos, entre otros, muchos clasifican como contaminantes de preocupación emergente o simplemente contaminantes emergentes (Bacci y Campo, 2022; Chacón, Reyes, Rivera y Barrantes, 2022; Krishnakumar, Singh, Godson y Thanga, 2023). Su disposición sin tratamiento o su remoción ineficiente e inefectiva en las plantas de tratamiento convencionales determina su vertido constante al ambiente, por lo que se encuentran en prácticamente en todos los compartimentos ambientales y se pueden considerar pseudopersistentes (Aemig, Hélias y Patureau, 2021).

La mayor parte son solubles en agua, lo que les permite interactuar con las células de los seres vivos lo que, aunado a otras propiedades fisicoquímicas les confiere un carácter de disruptores endocrinos, compuestos tóxicos o genotóxicos a una cantidad significativa de ellos (Xue *et al.*, 2021). Su presencia es ubicua en aguas naturales y residuales de México y otros países de Latinoamérica (Navarro-Frómata, 2019¹; Morin-Crini *et al.*, 2022; Vázquez-Tapia *et al.*, 2022).

La creciente necesidad de agua para el riego agrícola conlleva a que se utilicen con frecuencia aguas superficiales muy contaminadas o agua residual sin tratamiento (Bayabil, Teshome y Li, 2022). Esto puede llegar a afectar incluso las aguas subterráneas. Además del vertido directo, los MCO están presentes en las corrientes de agua de las cuencas agrícolas por la escorrentía, especialmente cuando se aplica el riego por inundación o en época de lluvia (Turner, Warne, Dawes, Thompson y Will, 2019; Tian, Wark, Bogue y James, 2021; Lyu, Wu, Wen, Wang y Chen, 2022; Al-Hazmi *et al.*, 2023). Lo anterior condiciona la preocupación por la presencia de los MCO en el entorno agrícola (Snow *et al.*, 2020).

La ingesta del ganado y el riego con aguas contaminadas; así como el uso de biosólidos y lodos residuales como fertilizantes, condicionan el paso de los MCO, los microorganismos y genes resistentes a los antibióticos a la cadena trófica, representando un riesgo para la salud humana, la biota y los ecosistemas. (Llamas-Dios, Vadillo, Jiménez, Candela y Corada, 2021; Xue *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2021; Alderton *et al.*, 2021; Carsella, Mutz, Zuniga & Kinney, 2022; Smalla, Kabisch, Fiedler, Hammerl y Tenhagen, 2023).

En suelos irrigados con aguas contaminadas, en especial por períodos prolongados, los MCO se sorben en las partículas de éste o se encuentran en el agua intersticial, pudiendo permanecer en el medio por tiempo más o menos largo en dependencia de la estructura de cada sustancia y las condiciones ambientales (Chávez-Mejía *et al.*, 2019). Los procesos naturales de degradación pueden conducir a la eliminación de estos compuestos, aunque en ocasiones, se pueden formar metabolitos más peligrosos que los compuestos originales (Maddela, Ramakrishnan, Kakarla, Venkateswarlu y Megharaj, 2022; Narain-Ford, van Wezel, Helmus, Dekker y Bartholomeus, 2022; Garduño-Jiménez *et al.*, 2023).

Las plantas absorben los contaminantes presentes en las aguas de riego, los translocan a sus diferentes partes, incluyendo sus órganos aéreos y pueden bioacumularlos (Fernandes, Bragança y Homem, 2024). Esto conduce a su posible ingesta y consecuencias negativas para la población que los consume; además, incluye el riesgo de la aparición de genes resistentes a los antibióticos en el microbioma humano (González-García, Fernández, Polesel y Trapp, 2019; Picó *et al.*, 2019; Liu, Liang, Liu, Zhao y Han, 2020; Mordehay, Mordehay, Tarchitzky y Chefetz, 2022; Shi, Xiong, Kaur, Sy y Gan, 2022).

Se han documentado efectos negativos de los MCO, incluyendo los microplásticos, sobre el metabolismo, ciclos, rutas, fisiología y desarrollo de las plantas (Beltrán, Pablos, Torija, Porcel y González, 2020; Colzi *et al.*, 2022; Pérez, Doucette y Moore, 2022; Kim, Song, Ramu y Choi, 2023).

De lo anterior se concluye que al regar con aguas contaminadas, considerando sus beneficios y los riesgos por la presencia de los microcontaminantes orgánicos, se deben de emplear técnicas de irrigación que disminuyan los riesgos por contaminación, lo cual debe ser estrictamente regulado. En la legislación mexicana, pese a la reciente actualización de la NOM-001, los MCO no son regulados (Tripathi, Rajput, Patel y Nain, 2019; Helmecke, Fries y Schulte, 2020; SEMARNAT, 2022; Teshnizi, Ghobadinia, Abbasi, Hallett y Sepehrnia, 2023).

El primer paso para enfrentar el problema de la presencia de MCO en aguas de riego y suelos es su detección. En el presente trabajo se aborda la determinación de la línea base de las concentraciones de grupo de estos contaminantes en agua de riego de la región de Atlixco-Izúcar en el Estado de Puebla, México y en suelos agrícolas de las cuencas media y baja del río Sinú, en el departamento de Córdoba, Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras

Las muestras de agua de riego se recolectaron en 15 parcelas distribuidas en la zona de riego del Valle Atlixco-Izúcar, durante la época de seca (Figura 1). También se tomaron 5 muestras del río Nexapa que atraviesa dicho Valle. Los detalles de sus coordenadas y cultivos están descritos en la literatura (Navarro-Frómata, Herrera y Castro, 2020).

¹ Navarro-Frómata, A. E. (2019). Consideraciones sobre el estudio de los microcontaminantes orgánicos en México, en *Noveno Minisimposio Internacional sobre Remoción de Contaminantes de Aguas, Atmósfera y Suelos* (pp. 143-152). Villahermosa, Tabasco, México. UNAM-UJAT.

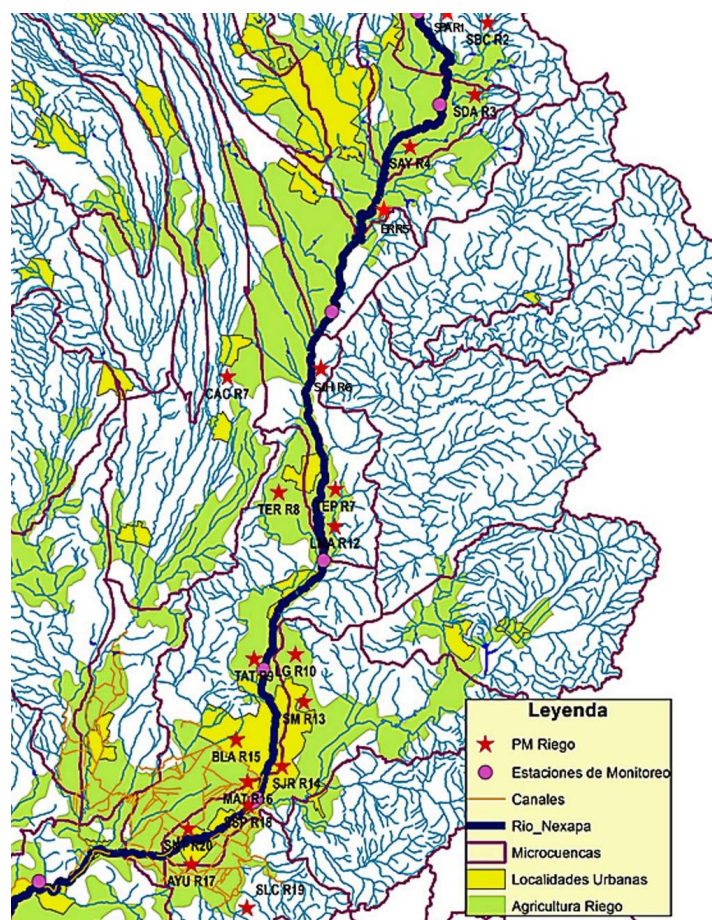


Figura 1. Mapa con la ubicación de los sitios de estudio (PM Riego).

Fuente: Elaboración propia.

Figure 1. Map with the study site location (PM Riego). Source: Own elaboration.

Las muestras de suelo se tomaron en la cuenca del río Sinú, ubicada en el norte de Colombia. La localización de los puntos de muestreo de suelos ($n = 20$) reflejó la diseminación de tierras agrícolas en dicha cuenca, por lo que no fue regular, ya que se pretendía reflejar diferentes unidades geográficas y cultivo regados con el agua del Sinú (Figura 2).

Cada muestra se hizo a partir de una mezcla de cinco submuestras recolectadas de cinco puntos de un área de alrededor de 100 m^2 . Todas las submuestras de suelo se recolectaron a profundidad de 0 - 20 cm con una pala de acero inoxidable. La hierba y otras impurezas se retiraron de la superficie de cada ubicación de muestra antes de su colecta. Las muestras de suelo se secaron a temperatura ambiente ($25 - 28 \text{ }^\circ\text{C}$) durante 10 días, se tamizaron a $< 2 \text{ mm}$ y se almacenaron a $4 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta la extracción. Se determinaron las principales características del suelo, incluido pH, materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y textura. Para la extracción de los MCO, se tomaron 5 g de suelo, se fortificaron con estándares deuterados, y se extrajeron en Soxhlet durante 16 horas. Los extractos se evaporaron casi a sequedad y se conservaron a $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta su análisis.

Determinación de los MCO

Para el análisis de compuestos orgánicos, las muestras de agua fueron fortificadas con estándares deuterados, filtradas y después se utilizó la extracción en fase sólida para la extracción/concentración de los compuestos orgánicos. Los filtros fueron extraídos y los extractos se combinaron con los de la extracción en fase sólida, se evaporaron casi a sequedad y se conservaron a $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta su análisis. A los extractos de las muestras de agua y suelos se les añadió un estándar interno y se reconstituyeron hasta volumen de $100 \text{ } \mu\text{L}$. La cuantificación de los MCO se realizó por cromatografía de gases/espectrometría de masas (CG/EM). Los detalles experimentales están descritos en la literatura (Navarro-Frómata, Herrera, Marrugo, Bayona y Morales, 2014).



Figura 2. Localización de los puntos de muestreo en la cuenca del río Sinú. Fuente: Elaboración propia.
Figure 2. Location of sampling points in the Sinú river basin.
 Source: Own elaboration.

Análisis Estadístico

El análisis estadístico se realizó con el paquete Statistica v. 13.1 (Tibco, 2017). La normalidad de las variables se evaluó mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y de Kolmogorov-Smirnov y Lilliefors. Para variables normales, las diferencias entre medias se evaluaron mediante análisis de varianza (ANOVA) de efectos principales (ANOVA EP) y ANOVA factorial (ANOVA-F), utilizando la prueba HSD de Tukey y un valor de $P < 0.05$ para considerarlas significativas. Para las que no mostraron normalidad se realizó un ANOVA de Kruskal-Wallis no paramétrico. Para reducir la dimensionalidad de los datos, se utilizó el análisis factorial con componentes principales (ACP), como método de extracción y rotación Varimax normalizada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Agua de Riego

De acuerdo con la ubicación geográfica se agruparon las muestras de agua por su procedencia de la zona alta, media o baja de la cuenca del río Nexapa perteneciente al valle Atlixco-Izúcar (Navarro-Frometa *et al.*, 2020). Se cuantificaron los siguientes MCO: Ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2, 4D), herbicida de amplio uso en la agricultura; cafeína (CAF), presente en muchas formulaciones de productos de uso doméstico e industrial; metil dihidrojasmonato (MDHJ), galaxolide (GAL) y tonalide (TON), fragancias de amplio espectro que se utilizan en la formulación de muchos productos; triclosan (TCS), un agente bacteriano y fungicida potente y de amplio uso; los alquilfenoles (AF), alquilfenoles monoetoxilados (AFMEO) y alquilfenoles dietoxilados (AFDEO), productos de la degradación de los alquilfenoles polietoxilados, tensioactivos difundidos en detergentes y formulaciones de otros productos industriales; naproxeno (NAP), un agente inflamatorio de amplia difusión; los bloqueadores solares sunscreen UV15 (SCR) y parsol MCX (PAR), presentes en cosméticos y otros productos de cuidado personal y el coprostanol (COP), producto de la transformación intestinal del colesterol y presentes en la heces de mamíferos. En los Cuadros 1a y 1b se muestran las concentraciones de estos compuestos. Los números de las muestras se detallan en Navarro-Frometa *et al.* (2020).

Cuadro 1a. Concentraciones de los MCO en las muestras de agua, $\mu\text{g L}^{-1}$. Fuente: elaboración propia.
Table 1a. Organic micropollutant (OMP) concentrations in water samples, $\mu\text{g L}^{-1}$. Source: Own elaboration.

Sample	2,4D	MDJH	CAF	GAL	TON	BHT	24DBF	TCS
R20	34.02	16.32	0.14	0.78	0.24	0.86	2.68	0.89
R18	11.28	9.2	0.18	0.58	0.13	0.71	2.51	1.86
R17	0	20.69	0.05	1.17	0.31	1.14	29.46	5.71
R16	12.24	17.93	0.22	1.96	0.43	1.43	4.89	0
R15	15.47	17.26	0.25	0.98	0.32	1.03	7.52	5.46
R14	84.69	11.14	1.35	0.62	0.2	1	2.48	1.47
R13	16.18	16.54	0.09	1.43	0.39	0.95	6.14	3.82
R12	179.51	17.22	1.55	1.27	0.35	0.81	3.28	22.99
R7	123.82	22.97	1.99	3.61	0.52	1.93	4.59	12
R8	69.91	21.01	12.79	1.81	0.41	1.34	2.42	0.84
R7	320.93	19.15	5.24	5.05	0.59	0.8	1.34	4.63
R4	41.42	7.57	2.14	0.45	0.11	0.29	1.49	1.12
R3	50.98	18.06	0.79	2.49	0.43	0.96	3.41	4.66
R1	23.97	30.87	4	2.07	0.56	2.68	12.07	2.66
R5	34.19	8.9	0.82	0.74	0.22	0.73	9.84	3.13

2,4D = ácido 2,4-diclorofenoxiacético; MDJH = metildihidrojasmonato; CAF = cafeína; GAL = galaxolide; TON = tonalide; BHT = butilhidroxitolueno; 24DBF = 2,4-diterbutilfenol; TCS = triclosán.
 2,4D = 2,4-dichlorophenoxyacetic acid; MDJH = methylidihydrojasmonate; CAF = caffeine; GAL = galaxolide; TON = tonalide; BHT = butylated hydroxytoluene; 24DBF = 2,4-diterbutylphenol; TCS = triclosan.

Cuadro 1b. Concentraciones de los MCO en las muestras de agua, $\mu\text{g L}^{-1}$. Fuente: Elaboración propia.
Table 1b. Organic micropollutant (OMP) concentrations in water samples, $\mu\text{g L}^{-1}$. Source: Own elaboration.

Sample	AF	AFMEO	AFDEO	NAP	SCR	PAR	COP
R20	4.92	2.43	0.86	0.16	0.16	3.75	1.3
R18	5.22	2.63	1.61	0.74	0.88	1.99	64.3
R17	5.42	1	1.06	0.06	1.3	3.25	128.57
R16	6.15	1.02	0	0	0	0.36	232.57
R15	9.24	3	1.87	0.51	0.92	3.2	34.45
R14	8.59	5.12	1.89	1.41	0.75	2	36.6
R13	12.57	2.59	2.07	0.1	0.58	3.74	112.73
R12	11.81	7.31	2.1	5.35	1.25	3.75	12.49
R7	30.08	11.62	3.12	0.82	0.64	3.1	289.13
R8	8.98	4.94	2.39	5.67	0.89	2.93	51.06
R7	59.95	21.26	6.52	9.71	0.82	1.65	782.21
R4	4.8	2.79	1.15	0.15	0.32	2.29	10.93
R3	16.93	6.32	2.5	0.79	0.56	2.05	238.15
R1	22.81	5.43	8.97	1.06	1.73	7.89	67.09
R5	8.14	6.97	1.67	0.2	0.3	2.72	2.66

AF = alquilfenoles; AFMEO = alquilfenoles monoetoxilados; AFDEO = alquilfenoles dietoxilados; NAP = naproxeno; SCR = sunscreen; PAR = parsol MCX; COP = coprostanol.
 AF = alkylphenols; AFMEO = monoethoxylated alkylphenols; AFDEO = diethoxylated alkylphenols; NAP = naproxen; SCR = sunscreen; PAR = parsol MCX; COP = coprostanol.

El ANOVA de una vía arrojó que sólo hay diferencias significativas (considerando las muestras de las tres zonas y el río), para el 2,4D, MDHJ, TON y NAP. En general, las concentraciones en la zona media (RiegoM) son las más elevadas, sin diferencias significativas con las del río para los demás MCO. Esto puede estar relacionado con la ubicación de las parcelas de esa zona, con acequias de riego que pasan cerca de poblaciones sin drenaje, que pueden estar vertiendo aguas residuales domésticas a ellas, ocasionando la recontaminación de las aguas de riego como se ha observado en otros casos (Espira *et al.*, 2024).

En lo que respecta a los perfiles de las concentraciones, se detectaron dos tipos de perfiles (Figuras 3a y b), que se ilustran con el 2,4D y el MDHJ. Un perfil similar al 2,4D lo presentan la CAF, GAL, TON, TCS, AF, AFMEO y el NAP. El MDHJ, el SCR y el PAR presentan valores medios de la concentración mayores que el río (significativamente solamente el MDHJ), con un perfil como el que se muestra en la Figura 3b.

Las concentraciones detectadas de estos compuestos superan las reportadas en España para aguas de riego después de ser tratadas (Calderón-Preciado, Matamoros y Bayona, 2011a), como se puede apreciar al comparar los valores medios de sus concentraciones en México con los reportados para España. A continuación, se indican los MCO y la relación de los valores medios de sus concentraciones en $\mu\text{g L}^{-1}$ en México y España, $C_{\text{Mex}}/C_{\text{Esp}}$: MDHJ 27.0; CAF 4.7; GAL 5.0; BHT 3.3; TCS 45.4; AF 160.9; NAP 4.3. En general, las aguas de riego tienen baja calidad desde este punto de vista y tienen los mismos riesgos que las aguas residuales municipales que se reúsan. La elevada contaminación de aguas de riego se aprecia al comparar las concentraciones medias de CAF, TCS, AF y NAP (1.83, 3.63, 12.86 y 1.47 $\mu\text{g L}^{-1}$, respectivamente), con los valores reportados para los octilfenoles y el NAP en el valle del Mezquital (0.7-1.0 y 2.9-7.3 $\mu\text{g L}^{-1}$, respectivamente) conocido por el uso masivo de aguas residuales para riego (Garduño-Jiménez *et al.*, 2023), aunque inferiores a las máximas encontradas en aguas naturales/residuales mexicanas de NAP (4.48/123), TCS (90 000/2.0, CAF (-/42.8) y nonilfenoles (85.5/39.3), reportadas en (Vázquez-Tapia *et al.*, 2022).

En el Cuadro 2 se muestran las proyecciones de las concentraciones de MCO consideradas como variables para el ACP en los tres primeros componentes principales (CP) que explican 80% de la varianza. Se observa que GAL, AF, AFMEO y COP tienen el mayor peso en el CP1, el MDHJ, el BHT y el PAR en el CP2 y la CAF en el CP3. En la Figura 4 se muestran las puntuaciones de las muestras, y se aprecia que las muestras del río se agrupan y están cercanas a las muestras de la parte alta y baja (RA, RB) en el eje del CP1, mientras que las muestras de la parte media (RM), presentan cierta agrupación caracterizada por valores mayores del CP1.

Muestras de Suelo

En las muestras de suelo fueron cuantificados los siguientes MCO (mismas abreviaturas en algunas ya utilizadas): GAL, MDHJ, TON, AF y BHT. La estadística descriptiva de los valores de sus concentraciones se muestra en el Cuadro 3. Lo que llama la atención, son los elevados valores del MDHJ, lo que puede estar relacionado con su presencia en las formulaciones de diferentes plaguicidas y productos del cuidado personal. No se puede descartar su empleo en formulaciones de reguladores de crecimiento y otros productos para incrementar la resistencia de los cultivos a diferentes tipos de estrés (Li, Wang, Menzies, Lombi y Kopittke, 2018).

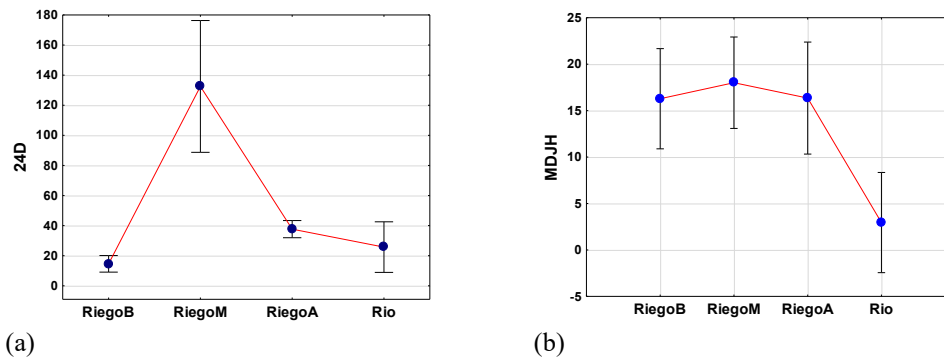


Figura 3. Perfiles de concentración del 24D y el MDHJ. Las barras verticales representan los intervalos del 95% de confianza. Fuente: Elaboración propia.
Figure 3. Concentration profiles of 24D and MDHJ. Vertical bars denote 0.95 confidence intervals. Source: Own elaboration.

Cuadro 2. Proyecciones de las variables en los tres primeros componentes principales. Fuente: elaboración propia.
Table 2. Projections of the variables in the first three principal components. Source: Own elaboration.

Variable	CP1	CP2	CP3
MDJH	0.273 833	0.899 423	0.119 225
CAF	0.176 819	0.157 463	0.905 427
GAL	0.913 930	0.300 108	0.105 494
TON	0.580 715	0.720 764	0.114 300
BHT	0.125 175	0.891 831	0.104 286
24DBF	-0.161 866	0.667 373	-0.380 385
TCS	0.266 972	0.454 267	-0.170 697
AF	0.946 646	0.199 368	0.144 167
AFMEO	0.908 974	0.151 498	0.201 881
AFDEO	0.506 964	0.604 875	0.350 931
NAP	0.683 187	0.080 209	0.562 179
SCR	0.096 834	0.823 141	0.208 548
PAR	-0.168 112	0.868 565	0.178 388
COP	0.904 747	-0.252 483	-0.022 354

En letra negrita las variables con proyecciones mayores a 0.85. MDJH = metildihidrojasmonato; CAF = cafeína; GAL = galaxolide; TON = tonalide; BHT = butilhidroxitolueno; 24DBF = 2,4-diterbutilfenol; TCS = triclosán; AF = alquilfenoles; AFMEO = alquilfenoles monoetoxilados; AFDEO = alquilfenoles dietoxilados; NAP = naproxeno; SCR = Sunscreen; PAR = Parsol MCX; COP = Coprostanol.

In bold letters the variables with projections greater than 0.85. MDJH = methyl-dihydrojasmonate; CAF = caffeine; GAL = galaxolide; TON = tonalide; BHT = butylated hydroxytoluene; 24DBF = 2,4-diterbutylphenol; TCS = triclosan; AF = alkylphenols; AFMEO = monoethoxylated alkylphenols; AFDEO = diethoxylated alkylphenols; NAP = naproxen; SCR = Sunscreen; PAR = Parsol MCX; COP = Coprostanol.

En el Cuadro 4 se muestran los coeficientes de correlación entre las variables, que incluye los índices fisicoquímicos determinados en el suelo. Las correlaciones entre los MCO indican un origen común. No se encontraron correlaciones significativas con las características del suelo, aunque se evidencia una influencia positiva de la materia orgánica del suelo, excepto para la cafeína y el BHT.

En el Cuadro 5 se muestran las proyecciones de las variables (concentraciones de MCO) en los tres primeros CP del ACP que explica 90% de la varianza de las muestras. Se observa que las principales variables son el BHT en el CP1, la CAF en el CP2 y el MDHJ en el CP3. La Figura 5 señala las puntuaciones de las muestras en los 3 primeros CP. Las muestras de suelos dedicados (al menos en los momentos cercanos al muestreo) a los cultivos de algodón y maíz, indican una clara agrupación hacia los menores valores del CP1 y CP3, lo que corresponde a menores concentraciones de BHT y MDHJ, lo que puede estar relacionado con la aplicación de productos químicos en las labores agrícolas de estos cultivos.

Cuadro 3. Estadística descriptiva de los MCO analizados en los suelos de Colombia, mg kg⁻¹. Fuente: elaboración propia.
Table 3. Descriptive statistics of Colombian soil samples, mg kg⁻¹. Source: Own elaboration.

MCO	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
CAF	0.618	0.325	0.000	3.088	0.018
GAL	0.583	0.430	0.195	1.640	0.373
TON	0.428	0.319	0.140	0.941	0.275
MDHJ	10.645	9.062	1.810	29.325	6.297
AF	1.466	1.132	0.000	6.354	1.680
BHT	0.130	0.106	0.003	0.493	0.146

CAF = cafeína; GAL = galaxolide; TON = tonalide; MDJH = metildihidrojasmonato; AF = alquilfenoles; BHT = butilhidroxitolueno.

CAF = caffeine; GAL = galaxolide; TON = tonalide; MDJH = methyl-dihydrojasmonate; AF = alkylphenols; BHT = butylated hydroxytoluene.

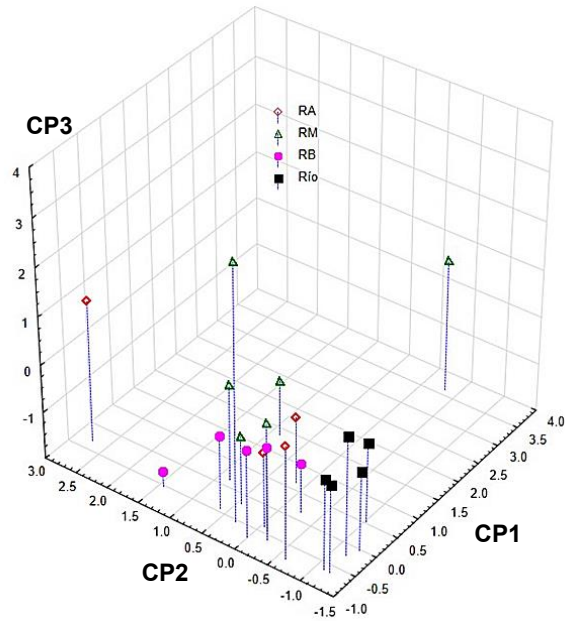


Figura 4. Puntuaciones de las muestras de agua en los tres primeros componentes principales. Fuente: Elaboración propia.

Figure 4. Water sample scores in the first three principal components. Source: Own elaboration.

La comparación de los resultados obtenidos con lo que se ha reportado en la literatura no es sencillo, pues muchos trabajos atienden a determinados contaminantes, fundamentalmente fármacos no determinados en este estudio y, además el reporte de sus concentraciones es muy heterogéneo y los niveles de las concentraciones de los MCO dependen de la calidad del agua de riego y del tiempo que se ha empleado (García-Valverde *et al.*, 2023; Fernandes *et al.*, 2024).

Cuadro 4. Correlación entre los MCO y los índices del suelo. Fuente: elaboración propia.

Table 4. Correlations between organic micropollutant (OMP) and soil indices. Source: Own elaboration.

	CAF	GAL	TON	MDHJ	AF	BHT
CAF	1.00	0.19	0.15	0.16	0.11	0.12
GAL	0.19	1.00	0.91	0.67	0.78	0.62
TON	0.15	0.91	1.00	0.53	0.75	0.68
MDHJ	0.16	0.67	0.53	1.00	0.59	0.23
AF	0.12	0.78	0.75	0.59	1.00	0.57
BHT	0.12	0.62	0.68	0.23	0.57	1.00
MO	-0.17	0.20	0.26	0.30	0.26	-0.09
CIC	-0.32	0.58	0.62	0.36	0.60	0.42
pH	0.26	-0.20	-0.08	-0.20	-0.07	0.30
% Arcilla	0.26	0.12	0.21	-0.05	0.15	0.46
% Arena	-0.23	-0.31	-0.43	-0.09	-0.28	-0.51
% Limo	-0.17	0.16	0.15	0.19	0.07	-0.16

En letra negrita se indican los valores significativos. CAF = cafeína; GAL = galaxolide; TON = tonalide; MDHJ = metildihidrojasmonato; AF = alquilfenoles; BHT = butilhidroxitolueno; MO = materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; pH = potencial de hidrógeno.

Significant values are indicated in bold type. CAF = caffeine; GAL = galaxolide; TON = tonalide; MDHJ = methyl-dihydrojasmonate; AF = alkylphenols; BHT = butylated hydroxytoluene; OM = organic matter; CEC = cation exchange capacity; pH = hydrogen potential.

Cuadro 5. Proyecciones de las variables en los tres primeros CP. Fuente: elaboración propia.
Table 5. Factor loadings in the first three profile concentrations (PC). Source: Own elaboration.

Variable	CP1	CP2	CP3
CAF	0.067 129	0.994 014	0.079 940
GAL	0.686 838	0.091 788	0.657 792
TON	0.787 443	0.057 218	0.509 157
MDHJ	0.107 534	0.089 042	0.943 846
AF	0.625 689	0.019 457	0.624 108
BHT	0.939 959	0.064 621	0.025 705

En letra negrita se indican los valores mayores a 0.85. CAF = cafeína; GAL = galaxolide; TON = tonalide; MDHJ = metildihidrojasmonato; AF = alquilfenoles; BHT = butilhidroxitolueno; CP1 = componente principal 1; CP2 = componente principal 2; CP3 = componente principal 3.
 Values greater than 0.85 are indicated in bold letters. CAF = caffeine; GAL = galaxolide; TON = tonalide; MDHJ = methylhydrojasmonate; AF = alkylphenols; BHT = butylated hydroxytoluene; CP1 = principal component 1; CP2 = principal component 2; CP3 = principal component 3.

Los valores de concentración de la mayoría de los MCO estudiados en suelos de la cuenca del río Sinú, con excepción del GAL y el BHT, están por encima de los valores observados en predios regados con agua de río en España (Calderón-Preciado, Jiménez, Matamoros y Bayona, 2011b), pese a ser el río Sinú un río con niveles de contaminación inferiores a los del río Nexapa (Herrera-Cárdenas, Navarro, Burgos, Marrugo y Bayona, 2019). A continuación se indican los MCO y la relación de los valores medios de sus niveles, en g ha^{-1} , en México a los reportados para España $\text{Ca}_{\text{Mex}}/\text{Ca}_{\text{Esp}}$: CAF 1.235/0.476; GAL 1.167/2.046; TON 0.857/0.714; MDHJ 21.289/1.024; AF 2.933/0.356; BHT 0.260/0.532). Se han reportado valores de la concentración (se indican intervalos y valor medio, en mg kg^{-1}), de CAF (0.8-4.9, 2.1) y GAL (0.3-7.4, 2.8) del mismo orden de magnitud que los encontrados en este estudio (García-Valverde *et al.*, 2023). Asimismo se ha reportado la presencia de Gal y TON en diferentes tipos de suelos en Suiza en concentraciones que oscilan entre ND-17 y ND-37 mg kg^{-1} (ND - no detectado), respectivamente (Chiaia-Hernández *et al.*, 2020).

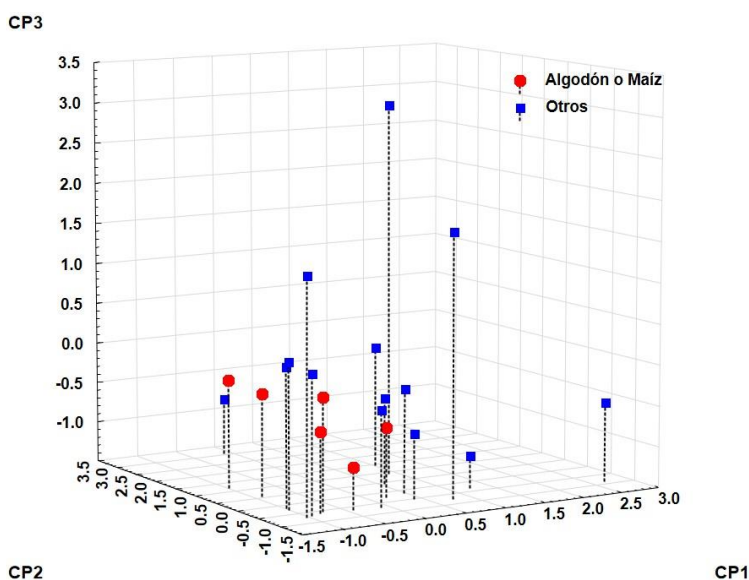


Figura 5. Puntuaciones de las muestras de suelos en los tres primeros CP. Fuente: Elaboración propia.
Figure 5. Soil sample scores in the first three profile concentrations (PC). Source: Own elaboration.

Necesidades a Futuro

Considerando que la humanidad ya ha traspasado las fronteras planetarias de la contaminación química (Persson *et al.*, 2022), es evidente que una de las primeras necesidades es sensibilizar a las autoridades y ciudadanos en general sobre los MCO y otros contaminantes de preocupación emergente, al mejorar la comunicación entre ellos y la academia y estimular el trabajo en redes especialmente en este último sector, al considerar en primer lugar los riesgos para las comunidades y sectores más desfavorecidos (Sanganyado, 2022; Gwenzi, Simbanegavi y Rzymiski, 2023). Evidentemente, el uso del agua residual tratada o no, va a continuar por lo que se hace necesario hacer los análisis técnico-económicos que permitan evaluar que cultivos regar con el agua residual disponible a nivel local para incrementar la sostenibilidad del riego y avanzar hacia una economía circular (Mainardis *et al.*, 2022). También es necesario avanzar en el marco regulatorio sobre los niveles de los MCO en los distintos compartimentos ambientales, (Jacobo-Marín y Santacruz, 2021). Además es importante avanzar en los estudios sobre el origen, presencia, transporte y destino final de estos contaminantes en los suelos regados con aguas residuales, tratadas o no, así como en los productos agrícolas que ahí se obtienen, con una mayor atención a los MCO característico de los países de Latinoamérica (Chen y Akhtar, 2022; Garduño-Jiménez *et al.*, 2023).

CONCLUSIONES

El uso de agua muy contaminada para el riego conduce, en el caso estudiado en México a valores muy elevados de las concentraciones de los MCO en las mismas. Esto se debe en primer lugar a los niveles de estos contaminantes en el río Nexapa cuyas aguas reciben un trasvase de aguas fuertemente contaminadas del río Atoyac y además se observa el impacto de las descargas de agua residual doméstica sin tratar a las acequias y canales de riego.

En el caso de los suelos estudiados en Colombia, aunque el nivel de contaminación del río Sinú es mucho menor que en el caso anterior, el riego sostenido con sus aguas da por resultado concentraciones elevadas de los MCO en los suelos.

Lo anterior permite recomendar que es necesario regular y vigilar los niveles de estos contaminantes en las aguas de riego y tratar en el origen, las descargas de aguas municipales antes de descargarlas a los cuerpos receptores.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia" en esta sección.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización; investigación; escritura: preparación del borrador original; escritura: revisión y edición: A.E.N.F. Investigación; escritura: revisión y edición: J.L.M.N. Investigación; escritura: revisión y edición: J.M.B.T.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se realizó con financiamiento del Proyecto 11-CAP2-1756, de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo.

LITERATURA CITADA

- Aemig, Q., Hélias, A., & Patureau, D. (2021). Impact assessment of a large panel of organic and inorganic micropollutants released by wastewater treatment plants at the scale of France. *Water Research*, 188, 116524. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116524>
- Al-Hazmi, H. E., Mohammadi, A., Hejna, A., Majtacz, J., Esmaeili, A., Habibzadeh, S., ... & Mąkinia, J. (2023). Wastewater treatment for reuse in agriculture: Prospects and challenges. *Environmental Research*, 236, 116711. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116711>
- Alderton, I., Palmer, B. R., Heinemann, J. A., Pattis, I., Weaver, L., Gutiérrez-Ginés, M. J., ... & Tremblay, L. A. (2021). The role of emerging organic contaminants in the development of antimicrobial resistance. *Emerging Contaminants*, 7, 160-171. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2021.07.001>
- Bacci, F., & Campo, P. (2022). Emerging and less commonly recognized chemical contaminants: Organic micropollutants. In T. Mehner, & K. Tockner (Eds.). *Encyclopedia of Inland Waters* (pp. 247-259). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819166-8.00038-4>
- Bayabil, H. K., Teshome, F. T., & Li, Y. C. (2022). Emerging contaminants in soil and water. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 873499. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.873499>
- Beltrán, E. M., Pablos, M. V., Torija, C. F., Porcel, M. Á., & González-Doncel, M. (2020). Uptake of atenolol, carbamazepine and triclosan by crops irrigated with reclaimed water in a Mediterranean scenario. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 191, 110171. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110171>
- Calderón-Preciado, D., Matamoros, V., & Bayona, J. M. (2011a). Occurrence and potential crop uptake of emerging contaminants and related compounds in an agricultural irrigation network. *Science of the total environment*, 412, 14-19. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.057>
- Calderón-Preciado, D., Jiménez-Cartagena, C., Matamoros, V., & Bayona, J. M. (2011b). Screening of 47 organic microcontaminants in agricultural irrigation waters and their soil loading. *Water Research*, 45(1), 221-231. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.07.050>
- Carsella, J. S., Mutz, J., Zuniga, T., & Kinney, C. A. (2022). Pharmaceuticals and personal care products as contaminants of emerging concern in sewage sludge and soils and the role of transformation products in their fate and environmental impact. In D. Barcelo, & A. G. Kostianoy (Eds.). *The Handbook of Environmental Chemistry* (pp. 243-265). Switzerland: Springer International Publishing.
- Colzi, I., Renna, L., Bianchi, E., Castellani, M. B., Coppi, A., Pignattelli, S., ... & Gonnelli, C. (2022). Impact of microplastics on growth, photosynthesis and essential elements in *Cucurbita pepo* L. *Journal of Hazardous Materials*, 423, 127238. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127238>
- Chacón, L., Reyes, L., Rivera-Montero, L., & Barrantes, K. (2022). Transport, fate, and bioavailability of emerging pollutants in soil, sediment, and wastewater treatment plants: potential environmental impacts. In H. S. Delfina, C. Dominguez, & W. Lee (Eds.). *Emerging Contaminants in the Environment* (pp. 111-136). The Netherlands: Elsevier.
- Chávez-Mejía, Navarro-González, Magaña-López, Uscanga-Roldán, Zaragoza-Sánchez, & Jiménez-Cisneros. (2019). Presence and natural treatment of organic micropollutants and their risks after 100 years of incidental water reuse in agricultural irrigation. *Water*, 11(10), 2148. <https://doi.org/10.3390/w11102148>
- Chen, H., & Akhtar, L. (2022). Fate and transport of pharmaceuticals and personal care products in soils and groundwater. In B. Gao (Ed.). *Emerging Contaminants in Soil and Groundwater Systems* (pp. 49-82). The Netherlands: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824088-5.00004-5>
- Chiaia-Hernández, A. C., Scheringer, M., Müller, A., Stieger, G., Wächter, D., Keller, A., ... & Hollender, J. (2020). Target and suspect screening analysis reveals persistent emerging organic contaminants in soils and sediments. *Science of the Total Environment*, 740, 140181. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140181>
- Espira, L. M., Contreras, J. D., Felix-Arellano, E. E., Siebe, C., Mazari-Hiriart, M., Riojas-Rodríguez, H., & Eisenberg, J. N. S. (2024). A comparative analysis of regional infection risk due to wastewater recontamination in the Mezquital Valley, Mexico. *Science of the Total Environment*, 919, 170615. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170615>
- Fernandes, A. S., Bragança, I., & Homem, V. (2023). Personal care products in soil-plant and hydroponic systems: Uptake, translocation, and accumulation. *Science of The Total Environment*, 912, 168894. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168894>
- García-Valverde, M., Aragonés, A. M., Andújar, J. A. S., García, M. D. G., Martínez-Bueno, M. J., & Fernández-Alba, A. R. (2023). Long-term effects on the agroecosystem of using reclaimed water on commercial crops. *Science of the Total Environment*, 859, 160462. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160462>
- Garduño-Jiménez, A. L., Durán-Álvarez, J.-C., Otori, C. A., Abdelrazig, S., Barrett, D. A., & Gomes, R. L. (2023). Delivering on sustainable development goals in wastewater reuse for agriculture: Initial prioritization of emerging pollutants in the Tula Valley, Mexico. *Water Research*, 238, 119903. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119903>
- González-García, M., Fernández-López, C., Polesel, F., & Trapp, S. (2019). Predicting the uptake of emerging organic contaminants in vegetables irrigated with treated wastewater - Implications for food safety assessment. *Environmental Research*, 172, 175-181. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.02.011>
- Gwenzi, W., Simbanegavi, T. T., & Rzymiski, P. (2023). Household disposal of pharmaceuticals in low-income settings: Practices, health hazards, and research needs. *Water*, 15(3), 476. <https://doi.org/10.3390/w15030476>
- Helmecke, M., Fries, E., & Schulte, C. (2020). Regulating water reuse for agricultural irrigation: risks related to organic micro-contaminants. *Environmental Sciences Europe*, 32(1), 4. <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0283-0>
- Herrera-Cárdenas, J. A., Navarro-Frómata, A. E., Burgos-Núñez, S., Marrugo-Negrete, J. L., & Bayona-Termens, J. M. (2019). Presencia e impacto de los contaminantes emergentes en aguas superficiales. En S. E Garridos-Hoyos, & J. Toribio-Jimenez (Eds.). *Tópicos sobre contaminantes y contaminación del agua* (pp. 31-52). Ciudad de México, México: CLAVE Editorial. ISBN: 978-607-437-507-7
- Jacobo-Marín, D., & Santacruz-de León, G. (2021). Contaminantes emergentes en el agua: Regulación en México, principio precautorio y perspectiva comparada. *Revista de Derecho Ambiental*, 1(15), 51-75. <https://doi.org/10.5354/0719-4633.2021.57414>

- Kim, E., Song, M., Ramu, A. G., & Choi, D. (2023). Analysis of impacts of exogenous pollutant bisphenol-A penetration on soybeans roots and their biological growth. *RSC Advances*, 13(15), 9781-9787. <https://doi.org/10.1039/d2ra08090g>
- Krishnakumar, S., Singh, D. S. H., Godson, P. S., & Thanga, S. G. (2022). Emerging pollutants: impact on environment, management, and challenges. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(48), 72309-72311. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22859-3>
- Li, C., Wang, P., Menzies, N. W., Lombi, E., & Kopittke, P. M. (2018). Effects of methyl jasmonate on plant growth and leaf properties. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 181(3), 409-418. <https://doi.org/10.1002/jpln.201700373>
- Liu, X., Liang, C., Liu, X., Zhao, F., & Han, C. (2020). Occurrence and human health risk assessment of pharmaceuticals and personal care products in real agricultural systems with long-term reclaimed wastewater irrigation in Beijing, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190, 110022. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110022>
- Llamas-Dios, M. I., Vadillo, I., Jiménez-Gavilán, P., Candela, L., & Corada-Fernández, C. (2021). Assessment of a wide array of contaminants of emerging concern in a Mediterranean water basin (Guadalhorce river, Spain): Motivations for an improvement of water management and pollutants surveillance. *Science of the Total Environment*, 788, 147822. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147822>
- Lyu, S., Wu, L., Wen, X., Wang, J., & Chen, W. (2022). Effects of reclaimed wastewater irrigation on soil-crop systems in China: A review. *Science of the Total Environment*, 813, 152531. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152531>
- Mainardis, M., Ceconet, D., Moretti, A., Callegari, A., Goi, D., Freguia, S., & Capodaglio, A. G. (2022). Wastewater fertigation in agriculture: Issues and opportunities for improved water management and circular economy. *Environmental Pollution*, 296, 118755. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118755>
- Maddela, N. R., Ramakrishnan, B., Kakarla, D., Venkateswarlu, K., & Megharaj, M. (2022). Major contaminants of emerging concern in soils: a perspective on potential health risks. *RSC Advances*, 12(20), 12396-12415. <https://doi.org/10.1039/d1ra09072k>
- Morin-Crini, N., Lichtfouse, E., Liu, G., Balaram, V., Ribeiro, A. R. L., Lu, Z., ... & Crini, G. (2022). Worldwide cases of water pollution by emerging contaminants: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(4), 2311-2338. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01447-4>
- Mordechay, E. B., Mordehay, V., Tarchitzky, J., & Chefetz, B. (2022). Fate of contaminants of emerging concern in the reclaimed wastewater-soil-plant continuum. *Science of The Total Environment*, 822, 153574. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153574>
- Narain-Ford, D. M., van Wezel, A. P., Helmus, R., Dekker, S. C., & Bartholomeus, R. P. (2022). Soil self-cleaning capacity: Removal of organic compounds during sub-surface irrigation with sewage effluent. *Water Research*, 226, 119303. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119303>
- Navarro-Frómata, A. E., Herrera-Cárdenas, J. A., Marrugo-Negrete, J. L., Bayona-Termens, J. M., & Morales-Morales L. (2014). Microcontaminantes orgánicos en los ríos de México: El caso del río Nexapa. En R. M. Aguilera (Ed.). *Ciencias Naturales y Exactas, Handbook T-IV* (pp. 55-66). Valle de Santiago, Guanajuato: ECORFAN.
- Navarro-Frómata, A. E., Herrera-López, H., & Castro-Bravo, C. (2020). Irrigation water challenges: A study case in the state of Puebla, Mexico. In E. Otazo-Sánchez, A. Navarro-Frómata, & V. Singh (Eds.). *Water Availability and Management in Mexico* (pp. 249-265). Switzerland: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24962-5_12
- Pérez, D. J., Doucette, W. J., & Moore, M. T. (2022). Contaminants of emerging concern (CECs) in *Zea mays*: Uptake, translocation and distribution tissue patterns over the time and its relation with physicochemical properties and plant transpiration rate. *Chemosphere*, 288, 132480. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132480>
- Persson, L., Carney-Almroth, B. M., Collins, C. D., Cornell, S., De Wit, C. A., Diamond, M. L., ... & Hauschild, M. Z. (2022). Outside the safe operating space of the planetary boundary for novel entities. *Environmental Science & Technology*, 56(3), 1510-1521. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04158>
- Picó, Y., Alvarez-Ruiz, R., Alfarhan, A. H., El-Sheikh, M. A., Alobaid, S. M., & Barceló, D. (2019). Uptake and accumulation of emerging contaminants in soil and plant treated with wastewater under real-world environmental conditions in the Al Hayer area (Saudi Arabia). *Science of the Total Environment*, 652, 562-572. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.224>
- Sanganyado, E. (2022). Policies and regulations for the emerging pollutants in freshwater ecosystems: Challenges and opportunities. In T. Dalu, & N. T. Tavengwa (Eds.). *Emerging Freshwater Pollutants* (pp. 361-372). The Netherlands: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822850-0.00007-7>
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2022). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. *Diario Oficial de la Federación*. D.F.: SEGOB.
- Shi, Q., Xiong, Y., Kaur, P., Sy, N. D., & Gan, J. (2022). Contaminants of emerging concerns in recycled water: Fate and risks in agroecosystems. *Science of the Total Environment*, 814, 152527. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152527>
- Smalla, K., Kabisch, J., Fiedler, G., Hammerl, J. A., & Tenhagen, B. A. (2023). Health risks from crop irrigation with treated wastewater containing antibiotic residues, resistance genes, and resistant microorganisms. *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz*, 66(6), 660-668. <https://doi.org/10.1007/s00103-023-03710-7>
- Snow, D. D., Cassada, D. A., Biswas, S., Malakar, A., D'Alessio, M., Marshall, A. H. L., & Sallach, J. B. (2020). Detection, occurrence, and fate of emerging contaminants in agricultural environments (2020). *Water Environment Research: A Research Publication of the Water Environment Federation*, 92(10), 1741-1750. <https://doi.org/10.1002/wer.1429>
- Teshnizi, F. A., Ghobadnia, M., Abbasi, F., Hallett, P. D., & Sepehrnia, N. (2023). Biochar and flow interruption control spatio-temporal dynamics of fecal coliform retention under subsurface drip irrigation. *Journal of Contaminant Hydrology*, 253, 104128. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2022.104128>
- Tian, Z., Wark, D. A., Bogue, K., & James, C. A. (2021). Suspect and non-target screening of contaminants of emerging concern in streams in agricultural watersheds. *Science of the Total Environment*, 795, 148826. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148826>
- Tibco (2017). *TIBCO STATISTICA User's Guide. Version 13*. Santa Clara, CA, USA: TIBCO Software Inc.
- Tripathi, V. K., Rajput, T. B. S., Patel, N., & Nain, L. (2019). Impact of municipal wastewater reuse through micro-irrigation system on the incidence of coliforms in selected vegetable crops. *Journal of Environmental Management*, 251, 109532. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109532>
- Turner, R. D. R., Warne, M. S. J., Dawes, L. A., Thompson, K., & Will, G. D. (2019). Greywater irrigation as a source of organic micro-pollutants to shallow groundwater and nearby surface water. *Science of the Total Environment*, 669, 570-578. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.073>
- Vázquez-Tapia, I., Salazar-Martínez, T., Acosta-Castro, M., Meléndez-Castolo, K. A., Mählknecht, J., Cervantes-Avilés, P., ... & Mora, A. (2022). Occurrence of emerging organic contaminants and endocrine disruptors in different water compartments in Mexico-A review. *Chemosphere*, 308, 136285. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136285>
- Xue, P., Zhao, Y., Zhao, D., Chi, M., Yin, Y., Xuan, Y., & Wang, X. (2021). Mutagenicity, health risk, and disease burden of exposure to organic micropollutants in water from a drinking water treatment plant in the Yangtze River Delta, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 221, 112421. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112421>
- Yang, Y., Chen, Z., Zhang, J., Wu, S., Yang, L., Chen, L., & Shao, Y. (2021). The challenge of micropollutants in surface water of the Yangtze River. *Science of the Total Environment*, 780, 146537. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146537>