

## REGULACIONES PARA LA DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES DE MÉXICO: COMPARACIÓN CON OTROS PAÍSES Y SU CUMPLIMIENTO EN PLANTAS DE TRATAMIENTO SELECCIONADAS

Regulations for wastewater discharge in Mexico:  
Comparison with other countries and enforcement in selected wastewater treatment plants

Lilian Edith DOMÍNGUEZ-MONTERO<sup>1</sup>, Héctor Mario POGGI-VARALDO<sup>1,2\*</sup>,  
Rosa Olivia CAÑIZARES-VILLANUEVA<sup>2</sup>, América Alejandra PADILLA VIVEROS<sup>1</sup>,  
Noemi RINDERKNECHT-SEIJAS<sup>3</sup>, Sergio CAFFAREL-MÉNDEZ<sup>4</sup> y Eduard DE LA CRUZ-BURELO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Programa Transdisciplinario en Desarrollo Científico y Tecnológico para la Sociedad, Av. Instituto Politécnico Nacional 2508, Gustavo A. Madero, San Pedro Zacatenco, 07360 Ciudad de México.

<sup>2</sup> Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Biotecnología y Bioingeniería, Grupo de Biotecnología Ambiental y de Energías Renovables, Av. Instituto Politécnico Nacional 2508, Gustavo A. Madero, San Pedro Zacatenco, 07360 Ciudad de México.

<sup>3</sup> Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas del Instituto Politécnico Nacional, División de Ciencia Básica, Av. Luis Enrique Erro S/N, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Zacatenco, Gustavo A. Madero, 07738, Ciudad de México.

<sup>4</sup> Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, División de Ingeniería Química y Bioquímica. Av. Tecnológico s/n, Valle de Anáhuac, Ecatepec, Estado de México, 55210, México.

\*Autor para correspondencia: lazarillodetormes1001@gmail.com

(Recibido: abril 2021; aceptado: marzo 2023)

Palabras clave: comparación internacional, límite máximo permisible, metales pesados, normas oficiales mexicanas.

### RESUMEN

El propósito de este estudio fue: i) describir y comparar las normas oficiales mexicanas de descarga de aguas residuales 1996 y 2021 (norma antigua, NA y norma nueva NN, respectivamente); ii) comparar las dos normas oficiales mexicanas para la descarga de aguas residuales con las regulaciones de Brasil, Estados Unidos, Canadá y la Unión Europea (UE); así como determinar el índice de permisividad de los contaminantes básicos y del subconjunto de los metales pesados y los cianuros, también llamados “otros contaminantes”; y iii) analizar el cumplimiento de las NN y NA mexicanas con una muestra de resultados analíticos de los efluentes de 25 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales que operan en un área metropolitana de México. Los resultados de esta investigación sugieren que la nueva NOM 2021 es muy cercana a la norma previa 1996 en términos de permisividad, y a su vez ambas son muchísimo más permisivas comparadas con las de los países desarrollados del Tratado entre México, Estados Unidos y Canadá (T-MEC) y de la UE. Los altos límites máximos permisibles de la mayoría de los contaminantes en ambas normas mexicanas podrían causar impactos negativos en los cuerpos de agua y en los bienes nacionales. Se recomienda la actualización y expansión de las NOM-002 y 003, y eventualmente la revisión de la propia NOM-001-2021 para eliminar o reducir el riesgo para la salud y el ambiente de los contaminantes del agua y homologar la calidad del recurso agua en el contexto de los países integrantes del T-MEC.

Key words: international comparison, maximum permitted level, heavy metals, Official Mexican Standards.

### ABSTRACT

The purpose of this study was: i) to describe and compare the 1996 and 2021 official Mexican standards for wastewater discharge (actual standard-NA and new standard-NN, as per the abbreviation in Spanish); ii) to compare the two official Mexican standards for wastewater discharge with the regulations of Brazil, the United States, Canada and the European Union (UE), as well as to determine the environmental permissiveness index of basic pollutants and the subset of heavy metals and cyanides (also called ‘other pollutants’); and iii) to analyze the compliance with the Mexican NN and NA of 25 municipal wastewater treatment plants that operate in a metropolitan area of Mexico. The results suggest that the new NOM 2021 is very close to the previous 1996 norm in terms of permissiveness, and in turn both are much more permissive compared to those of the developed countries of the United States-Mexico-Canada Agreement (USMCA) and the UE. The high permissible maximum levels of most pollutants in both Mexican standards could cause negative impacts on water bodies and national assets. The updating and expansion of NOM 002 and 003 is recommended, and eventually the revision of NOM 001 2021 itself is also recommended to eliminate or reduce the risk to health and the environment of water contaminants and upgrade the quality of the water resource in the context of the member countries of the USMCA.

### INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos naturales indispensable para el desarrollo de todos los organismos y para múltiples actividades humanas, y a pesar de que el tema del agua es un asunto prioritario a nivel mundial, la alta demanda de agua potable y la poca disponibilidad de este recurso sigue siendo un grave problema y evita el desarrollo de cualquier país (Romero-Aguilar et al. 2009, Doria y Igartua 2018).

La mayoría de las actividades humanas que utilizan agua producen aguas residuales (Domínguez-Montero et al. 2017, WWAP 2017). El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente ha definido al agua residual como “una combinación de aguas residuales domésticas, efluentes de establecimientos comerciales e industriales y escurrideros urbanos” (UNEP et al. 2004).

El mal manejo y la descarga inadecuada de las aguas residuales municipales (ARM), industriales y de otros tipos como es el drenaje agrícola y los escurrimientos pluviales, provocan la contaminación del agua al verterse directamente en cuerpos receptores de agua limpia sin un tratamiento adecuado (Carmona Lara 2008, Jiménez et al. 2010, De la Peña et al. 2013). Esto puede tener efectos nocivos para la salud humana, reducción en la productividad económica, calidad inadecuada del agua de descarga y por ende

la degradación de los ecosistemas acuáticos (Burian et al. 2000, Allaoui et al. 2015, WWAP 2017).

Por ello, el tratamiento de aguas residuales está tomando mayor importancia ya que el agua residual es una fuente alternativa y rentable para obtener agua reutilizable, aportando además nutrientes, materia orgánica y otros subproductos útiles, teniendo un manejo como “reutilización, reciclado y recuperación de recursos” (WWAP 2012, WWAP 2017).

Los materiales contaminantes en ARM son principalmente materia orgánica, nutrientes (nitrógeno y fósforo), cantidades traza de compuestos orgánicos recalcitrantes y metales en general. Por ello, el tratamiento de aguas residuales (TAR) es un ciclo virtuoso en el cual se genere agua tratada y sus derivados, siendo una de sus finalidades la mejora del ambiente y la reducción de aguas contaminadas (Romero-Aguilar et al. 2009, de la Peña 2013, Salgado-Bernal 2013).

La finalidad del TAR es remover materiales contaminantes, ya sean orgánicos o inorgánicos, tanto en forma de partículas suspendidas como de sustancias disueltas. El objetivo de ello es obtener una calidad de agua que cumpla con la legislación vigente para las descargas de agua o para el reúso destinado. En un sistema de TAR, al retirar el material contaminante éste se transforma en residuo, como los lodos, además de generar emisiones gaseosas (Poggi-Varaldo et al.

2002, Cano et al. 2012, Qian et al. 2016, Conagua 2017, WWAP 2017).

El TAR es importante para el saneamiento del agua, por ello se requiere el cumplimiento de legislación vigente y relevante sobre aguas residuales, además de la aplicación de tecnologías adecuadas. En forma importante, debe existir un nivel sano de inversión no solo orientada a la construcción de PTAR sino también a la operación y mantenimiento de estas (UNEP et al. 2004, Gutiérrez 2008, Ramón 2010, Hantke-Domas y Jouravlev 2011, Zurita et al. 2012, de la Peña et al. 2013, WWAP 2017).

En México, el tema del agua (incluida el agua residual) ha sido reconocido como un asunto de seguridad nacional, un elemento de la política ambiental y económica, así como un factor del desarrollo social (Conagua 2008, PNH 2014).

Como se observa en la **figura 1**, la legislación mexicana en materia de control de las descargas de aguas residuales está representada por un triángulo inverso donde la parte superior corresponde a las disposiciones generales mientras que el vértice inferior corresponde a las disposiciones específicas.



**Fig. 1.** Nivel de especificidad de la legislación mexicana en materia de aguas residuales.

Las normas oficiales mexicanas (NOM) de acuerdo con la Ley Federal sobre Metrología y Normalización (1992) son “la regulación técnica de observancia obligatoria expedida por las dependencias competentes, que establece reglas, especificaciones, atributos, directrices, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, servicio o método de producción u operación, así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje, marcado o etiquetado y las que se refieran a su cumplimiento o aplicación”.

Actualmente, en la sección de normas mexicanas en materia de aguas residuales se cuenta con tres NOM relevantes: NOM-001-SEMARNAT-2021 (SEMARNAT 2021) la cual sustituirá a la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1996) y que entró en vigor en abril del 2023, NOM-002-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1996b) y la NOM-003-SEMARNAT-1997 (SEMARNAT 1997). Mientras tanto, sigue siendo válida la versión de 1996. Las tres normas mencionadas se encuentran en función de la composición de las descargas residuales y de los cuerpos receptores (Mercado y Blanco 2003).

El propósito de este estudio fue: i) describir y comparar las normas oficiales mexicanas 001 de descarga de aguas residuales 1996 y 2021; ii) comparar las dos normas oficiales mexicanas para la descarga de aguas residuales y con las regulaciones de Brasil, los Estados Unidos, Canadá y la Unión Europea, así como determinar el índice de permisividad de los contaminantes básicos (PCB) y del subconjunto de los metales pesados y los cianuros (también llamados ‘otros contaminantes’, OC); y iii) finalmente, analizar el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-001-SEMARNAT-2021 con una muestra de resultados analíticos de los efluentes de 25 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (PTARM) que operan en un área metropolitana de México.

## METODOLOGÍA

De ahora en adelante, la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1996) también se referirá indistintamente como Norma 1996 o Norma Anterior o Norma Antigua (NA). Correspondientemente, la NOM-001-SEMARNAT-2021 (SEMARNAT 2021) se referirá indistintamente como Norma 2021 o Norma Nueva (NN), para acortar el texto.

El subconjunto de parámetros contaminantes básicos se referirá como PCB, mientras que el subconjunto de parámetros que contienen metales, cianuros y arsénico se referirá también como otros contaminantes u OC.

### Comparación de normas mexicanas de descarga de aguas residuales (1996 y 2021)

El alcance de esta sección incluye i) descripción de la nueva norma, NOM-001-SEMARNAT-2021 que actualiza la versión de 1996, y ii) comparación entre la norma NOM-001-SEMARNAT 1996 y la NOM-001-SEMARNAT-2021 con análisis estadístico (inferencias) (Anexo 1 Secciones A1-1, A1-2 y A1-3, para ver las cuestiones metodológicas).

La subsección A1-3.2 del Material Complementario muestra la metodología estadística seguida para el análisis estadístico de los límites máximos permisibles de las NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1996) y NOM-001-SEMARNAT-2021 (SEMARNAT 2021). Este análisis se caracteriza por lo siguiente:

- Se utilizó la dódima t-Student de media de una muestra (**Cuadro A1-3.2.2.1**), la dódima de Wilcoxon de la media de una muestra (Cuadro A1-3.2.2.2. y las dódimas de medias de dos muestras (**Cuadro A1.3.2.2.3**). Se usó el Caso 1. Los criterios de selección de las dódimas se incluyen debajo de los cuadros citados (Kreyszig 1970, Montgomery 1997, Daniel 2014).
- Los parámetros contaminantes analizados se organizan en dos subconjuntos: el subconjunto de los PCB comunes a ambas normas, y el subconjunto de OC comunes a ambas normas; en este segundo subconjunto aparecen contaminantes reconocidamente tóxicos.
- El análisis se divide por el tipo de descarga y se consideran dos casos: descarga a ríos (ríos en la NN) y descarga a suelos.

Se considera como variable el índice  $\alpha_j''$ , definido como el cociente entre el límite máximo permisible (LMP) en NN y el LMP en NA, a saber

$$\alpha_j'' = \frac{LMP_{NN}}{LMP_{NA}} \quad (1)$$

para cada parámetro contaminante j-ésimo

Así, la variable  $\alpha_j''$  se interpreta como un índice de permisividad contaminante.

Si  $\alpha_j'' < 1$ , indica que los LMP de la norma anterior son mayores que los de la norma nueva, y entonces la norma anterior es más permisiva. Si  $\alpha_j'' > 1$  entonces indica lo contrario.

Un paso adicional es la transformación logarítmica de los  $\alpha_j''$ , un recurso conocido para estabilizar la varianza y normalizar los datos (Montgomery 1997). En general, también disminuye el coeficiente de variación de la muestra de valores transformados, y frecuentemente se consigue que los datos transformados sean homoscedásticos.

La variable transformada se designó con el símbolo  $u_j''$ , a saber

$$u_j'' = \ln \alpha_j'' \quad (2)$$

Así, la variable  $u_j''$  se interpreta como otro índice de permisividad contaminante.

Si  $u_j'' < 0$ , indica que los LMP de la norma anterior son mayores que los de la norma nueva, y entonces la norma anterior es más permisiva. Si  $u_j'' > 0$  entonces indica lo contrario.

### Comparación de regulaciones de descarga de aguas residuales de México con las de países y regiones selectas

Se debe mencionar que en esta parte se comparó por un lado la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1996) con las regulaciones de otros países, y por otro lado se hizo lo mismo con la NOM-001-SEMARNAT 2021 (SEMARNAT 2021).

Para la selección de los países, primero se eligió a Brasil como país representativo de América Latina, ya que posee niveles de desarrollo económico, político y académico similares a los de México. Por ejemplo, el PIB de México es tan solo 15 % menor que el de Brasil, y las poblaciones son del orden de  $10^8$  habitantes (World Bank 2023, 2023b).

Se seleccionó a los Estados Unidos de América (EUA) debido a que es el principal socio comercial de México por el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN, ahora denominado T-MEC.) Además, México cuenta con un número importante de industrias estadounidenses y mineras canadienses que realizan actividades que alteran el ambiente. También se incluyó la comparación con Canadá, que es el segundo socio comercial de México en el T-MEC.

Si bien pudiera ser interesante comparar la normatividad de México con países de Australasia como Australia y Nueva Zelanda, razones de espacio y de prioridades aplicadas a las relaciones económicas entre países aconsejan no considerar dicha comparación en este primer artículo.

Nueva Zelanda es una isla que se encuentra a 11 107 km de México. Tiene una inversión extranjera directa muy baja en México (ca. 800 veces menor que la inversión de los EUA). La relación comercial llega a US\$ 16 000 000 anuales por la venta de vehículos de motor (Data México 2023). La importante inversión directa de EUA en México se debe a la instalación de empresas estadounidenses bajo el T-MEC y que pudiera generar una política de “invertir y contaminar” que incrementa las ganancias de las empresas estadounidenses que operan en México (Cole 2004).

Más aún, la población de México es 25 veces superior comparada con la población neozelandesa, mientras que Canadá tiene una población casi ocho veces superior a la de Nueva Zelanda y realizan un 84 % de tratamiento de las aguas residuales recolec-

tadas, el mismo porcentaje de tratamiento que ostenta Nueva Zelanda con una población menor (OCDE 2023, WBG 2023b).

Por su parte, Australia es el 36 socio comercial de México a nivel mundial y dista 14 345 km de México. Su inversión en México es muy baja y el intercambio comercial llega a sólo US\$ 146 000 000 (Data México 2023). Si se compara la inversión australiana en México con la correspondiente a Canadá, resulta 20 veces inferior para el caso de Australia.

Además, no se cuenta con empresas o industrias australianas o neozelandesas en México por lo que aún un índice alto de permisividad no tendría un impacto directo en México como lo tendrían los índices altos correspondientes de Estados Unidos y Canadá (Cole 2004).

Finalmente, si bien se tiene conocimiento que en materia de tratamiento de aguas residuales existen países con posible mejor legislación que México, la comparación de normatividades sobre aguas residuales podría ser material de análisis para un artículo futuro cuyo objetivo sería justamente el análisis comparativo de normatividades de México con países selectos de Australasia, entre otros.

La búsqueda de normatividad para aguas residuales en México, Brasil, EUA, Canadá y la UE consideró las leyes oficiales de los gobiernos correspondientes. En el caso de México, se consultó la NOM-001-SEMARNAT-1996 publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 24 de junio de 1996; la NOM-002-SEMARNAT-1996 emitida el 3 de junio de 1998 en el DOF, y la NOM-003-SEMARNAT-1997 que se publicó en el DOF el 21 de septiembre de 1998 (SEMARNAT 1996, SEMARNAT 1996b, SEMARNAT 1997). Para la nueva norma mexicana se consultó la NOM-001-SEMARNAT-2021 (SEMARNAT 2021).

Para Brasil, la norma vigente consultada para aguas residuales fue la Resolución No. 430 emitida el 13 de mayo de 2011 por el Ministerio del Medio Ambiente y el Consejo Nacional del Medio Ambiente (MMA 2011). Para el caso de la UE se consultó la Directiva del Consejo del 21 de mayo de 1991 sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas (Directiva 1991) y la Directiva 2020/741/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de la Unión Europea (Directiva 2020). Para los EUA se consultó el informe emitido por la EPA titulado “Sistema nacional de eliminación de descargas contaminantes” (EPA 2021). Para el caso de Canadá se consultó el “Programa de uso de alcantarillado: Guía para la descarga de aguas residuales de instalaciones industriales” emitida en 2020 por la Environment and Climate Change Canada (ECCC 2020).

Con la información obtenida se elaboraron dos cuadros; el primero con los parámetros contaminantes básicos emitidos considerados en la normatividad mexicana como temperatura, pH, aceites y grasas, sólidos sedimentables (SS), materia flotante, sólidos suspendidos totales (SST), demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), nitrógeno total (NT), fósforo total (PT), coliformes fecales y huevos de helminto (HH); mientras que el segundo representa a otros contaminantes, considerados en las normas oficiales mexicanas, como los metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn), los cianuros (CN<sup>-</sup>) y el metaloide arsénico (As).

Posteriormente, se realizaron los cocientes de contaminantes básicos y metales pesados, As y cianuros entre México y Brasil, EUA y la UE. Se seleccionó un destino de descarga representativo para cada NOM; en el caso de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1996), se optó por el destino de “ríos con uso público urbano”, para la NOM-002-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1996b) se seleccionó “alcantarillado”, mientras que para la NOM-003-SEMARNAT-1997 (SEMARNAT 1997) se eligió “servicio al público con contacto directo”.

Para cada parámetro se obtuvieron los índices de permisividad contaminante a partir de las ecuaciones 3 y 4 y sus transformadas logarítmicas en la ecuación 5.

$$\alpha = \frac{\text{LMP México}_{\text{NA}}}{\text{LMP otro país}} \quad (3)$$

$$\alpha' = \frac{\text{LMP México}_{\text{NN}}}{\text{LMP otro país}} \quad (4)$$

$$u = \ln(\alpha); u' = \ln(\alpha') \quad (5 \text{ a, b})$$

donde LMP México<sub>NA</sub> son los límites máximos permisibles establecidos para México en la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1996), LMP México<sub>NN</sub> son los LMP correspondientes a las NOM-001-Semarnat-2021, LMP otro país son los LMP de las regulaciones de Brasil, EUA, UE y Canadá. Adicionalmente,  $u$  es la transformada logarítmica (natural) de  $\alpha$  y  $u'$  es lo propio de  $\alpha'$ . También se calculó  $\alpha$  en la comparación de países tomando como numerador los LMP de la NOM-002-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1996b) y la NOM-003-SEMARNAT-1997 (SEMARNAT 1997); no se calculó  $\alpha'$  porque estas normas no fueron actualizadas. Se recomienda al lector referirse al Anexo 1 del Material Complementario para ver con

más detalle las definiciones de todas estas variables y las estrategias de inferencia estadística para los índices de permisividad, especialmente secciones A1.3 y A1.4.

Así, las variables  $\alpha_j$  y  $\alpha_j'$  se interpretan como índices de permisividad contaminante. Si cualquiera de ellas es  $> 1$ , indica que los LMP de la norma mexicana son mayores que los de la norma del otro país, y entonces la norma mexicana es más permisiva.

Si  $\alpha_j$  o  $\alpha_j' < 1$  entonces indica lo contrario.

Como se mencionó más arriba, la transformación logarítmica de los  $\alpha_j$  y  $\alpha_j'$  es un recurso conocido para estabilizar la varianza y hacer simétricos los datos (Montgomery 1997). En general, también disminuye el coeficiente de variación de la muestra de valores transformados, y frecuentemente se consigue que los datos transformados sean homoscedásticos.

Así, las variables  $u_j$  y  $u_j'$  se interpretan como índices de permisividad (transformados).

Si  $u_j$  o  $u_j' > 0$ , indica que los LMP de la norma mexicana correspondiente son mayores que los de la norma de otro país, y entonces la norma mexicana es más permisiva. Si  $u_j$  o  $u_j' < 0$  entonces indica lo contrario.

Con la información obtenida, se realizó la estadística básica para los  $\alpha$  de las categorías de contaminantes, obteniendo la mediana y la media aritmética (Ec. 6) para cada parámetro, siendo la media:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (6)$$

donde:

$N$  representa al número de datos en el conjunto de contaminantes

$x_i$  es la  $i$ -ésima observación dentro del conjunto de los  $\alpha$

En el Material complementario, en los cuadros de los resultados del análisis estadístico también se incluyen las medias geométricas de  $\alpha$  y  $\alpha'$  ( $\alpha_{mg}$  y  $\alpha'_{mg}$ ), a saber:

$$\alpha_{mg} = [\prod \alpha_j]^{(1/n)}, \text{ con } j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

y las desviaciones estándares denotadas con 's' correspondientes a la media aritmética.

Para el análisis estadístico se usará el Caso 2 del **cuadro A1-3.2.2.1** de la subsección A1-3.2. (donde se reúnen las dójimas de Student para una muestra).

### Cumplimiento de las normatividades mexicanas en plantas de tratamiento de México

Esta sección se utilizó una base de datos de 25 plantas de tratamiento de aguas residuales municipa-

les (PTARM) de un área metropolitana de México, donde se contaba con los resultados (promedios trimestrales) de parámetros físicos, químicos y microbiológicos incluidos en las NOM-001-SEMARNAT-1996 y 2021 (SEMARNAT 1996, 2021), y la NOM-003-SEMARNAT-1997 (SEMARNAT 1997), de un trimestre del año 2015 de las descargas de dichas plantas.

La información general de las 25 PTARM para parámetros contaminantes se presenta para el efluente en el **cuadro A2.2.1** del Anexo 2 del Material complementario. Todas las plantas estaban funcionales y monitoreadas en el momento de hacer las visitas, y los datos recabados correspondieron a periodos de funcionamiento normal y monitoreado.

Respecto a las características de las PTARM (**Cuadro A2.2.2**), se tiene que:

- Las 25 PTARM cuentan con volúmenes de tratamiento diversos oscilando entre los 3 a los 1300 m<sup>3</sup>/s.
- Son todas plantas de lodos activados; debido al tipo de tratamiento cuentan con cárcamo de recepción, sedimentador primario, reactor biológico, sedimentador secundario y sistema de desinfección.
- Hay cuatro que se construyeron en el siglo XXI, la mayoría ya tiene más de tres décadas, y ocho tienen más de 50 años en funcionamiento;
- El destino del efluente tratado en su mayoría es para riego de áreas verdes y relleno de lagos recreativos y otros cuerpos de agua.

De los datos resultantes, se verificó que las concentraciones de los 16 parámetros de aguas residuales cumplieran con los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad mexicana vigente (1996) y la normatividad actualizada (2021), y se obtuvo el porcentaje de PTARM que incumplían estos. Los parámetros de contaminantes básicos que se consideraron fueron pH, aceites y grasas, materia flotante, SST, DBO<sub>5</sub>, coliformes fecales y HH; mientras que entre los metales pesados se consideraron el Cd, Cr, Hg, Cu, Pb, Zn y Ni, el As y los CN<sup>-</sup>.

Posteriormente, de acuerdo con el tipo de incumplimiento se generaron dos clasificaciones:

- Incumplimiento A: Concentración del parámetro superior al LMP señalado en la normatividad mexicana
- Incumplimiento B: Parámetro no monitoreado o no determinado por la instancia correspondiente.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Comparación de normas mexicanas de descarga de aguas residuales NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-001-SEMARNAT-2021

Se presenta primero la descripción de la nueva norma 2021 (ver Sección A1-2. Descripción de la nueva norma, NOM-001-SEMARNAT-2021 (SEMARNAT 2021) en el Material complementario). Después, sigue una comparación cualitativa de ambas normas (ver Sección A1-3.1. Discusión general)

El análisis estadístico de  $\alpha_j$  y  $u_j$  para los subconjuntos de parámetros contaminantes básicos (PCB) y la lista de otros contaminantes (OC) será parte de esta subsección dedicada a la comparación estadística de las dos normas mexicanas. Se recomienda al lector leer las secciones relevantes del Material complementario.

El **cuadro A1-3.2.3.1** reúne información sobre los LMP de ambas normas para los dos subconjuntos de parámetros (PCB y OC) y los índices de permisividad  $\alpha$  y  $u$  para los dos tipos de descarga más importantes (ríos y suelos).

La información sobre LMP se ha presentado en la subsección A1.2 pero se ha condensado aquí otra vez para facilitar la comprensión y referencias al lector. Un primer examen de esta información también se ha presentado en la subsección anterior.

El **cuadro A1-3.2.3.2** exhibe los detalles más relevantes del análisis estadístico y los resultados obtenidos. A su vez, las de este análisis estadístico se recopilaron en el **cuadro sinóptico A1A-3.2.3.3**.

De los cuadros incluidos en esta subsección pueden resumirse las siguientes tendencias:

- Después de un cuarto de siglo entre revisiones de las normas NN y NA, no se han añadido regulaciones para nuevos parámetros tóxicos o potencialmente tóxicos en el subconjunto OC. Un rasgo positivo es que se añade un parámetro crucial, toxicidad, a los PCB con base en bioensayos microbiológicos relativamente rápidos y de bajo costo.
- No hay un efecto virtuoso general y concluyente de la NN, es decir, que esta baje la permisividad en todos los casos comparado con la NA. El efecto depende del tipo de subconjunto de parámetros contaminantes y del tipo de descarga.
- Así, la NN es más permisiva que la NA para los casos PCB-descarga a suelos y OC-descarga a ríos.
- A modo de compensación, hay una menor permisividad de la NN en los casos de OC-descarga a ríos y PCB-descarga a suelos

- Hay un fuerte efecto distintivo de permisividad entre subconjuntos de contaminantes (OC vs PCB) para la descarga a ríos. Los  $\alpha$  promedio indican un valor mayor a 1.444 para OC mientras que para PBC fue solamente 0.825. Su razón es  $1.75 = 1.444/0.825$ . La permisividad en OC es en general un 75 % mayor que la de PCB en descarga a ríos. Es un efecto preocupante porque en OC hay contaminantes reconocidamente tóxicos. Entonces, la NN no estaría cumpliendo su cometido de ser más severa que la NA en este subconjunto importante de contaminantes. Para este caso se ha determinado que la diferencia entre 1.444 y 0.8250 es significativa a un nivel  $\alpha = 0.05$ .
- Para la descarga a suelos, no se encontró diferencia significativa entre los promedios de  $\alpha$  de PCB y OC
- Hay buena coincidencia entre resultados de los dos tipos de dósimas utilizadas para el análisis de  $\alpha$  y  $u$  (t-Student y Wilcoxon). Los resultados son similares.
- En general, las dósimas con  $u$  discriminan mejor las diferencias entre los estadígrafos observado y crítico, esto es,  $t_o$  y  $t_c$ , que en las dósimas de  $\alpha$  y sugieren que la decisión de usar variables transformadas fue correcta.

### Comparación de regulaciones de descarga de aguas residuales de México con las de países y regiones selectos

#### Contaminantes básicos

Como se puede apreciar en **cuadro I**, se realizó la comparación de las normas vigentes de los países selectos con México para los contaminantes básicos señalados en las normas oficiales mexicanas que describe como “aquellos compuestos y parámetros que pueden ser removidos o estabilizados mediante tratamientos convencionales”.

México es el único país de los analizados que tiene cuadros diversos de parámetros dependiendo de los destinos de las descargas (bien nacional y su uso), y para ello se cuenta con tres normas oficiales mexicanas y una cuarta norma que entró en vigor en abril de 2023. La NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1996) se enfoca en cinco destinos que son ríos, embalses naturales y artificiales, aguas costeras, suelo y humedales naturales; estos a su vez, se separan por los usos que tiene cada destino como: uso en riego agrícola, uso público urbano, protección de vida acuática, explotación pesquera, navegación y otros usos, recreación y estuarios (**cuadro I**). Además, se señalan tres cuerpos receptores (A, B y C) que de acuerdo con la Ley Federal de Derechos

**CUADRO I. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES BÁSICOS PARA LA DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES EN**

País o región	Cuerpo receptor	T (°C)	pH	Aceites y grasas (mg/L)	Materia flotante	SS (mL/L)	SST (mg/L)	
Brasil	Cuerpos de agua y alcantarillado	40	5-9	20	Ausente	1	NAp	
Canadá	Cuerpos de agua y alcantarillado	40	5.5-9	15	NAp	NAp	15	
Estados Unidos de América	Cuerpos de agua y alcantarillado	40	5.5-9	10	NAp	1	15	
Unión Europea	Cuerpos de agua y alcantarillado	12-40	NAp	NAp	NAp	1	35	
México NOM-001-SEMAR- NAT-1996	Ríos	Uso en riego agrícola	NAp				150	
		Uso público urbano	40	5-10	15	Ausente	1	75
		Protección de vida acuática	40					40
	Embalses naturales y artificiales	Uso en riego agrícola	40	5-10	15	Ausente	1	75
		Uso público urbano						30
	Aguas costeras	Explotación pesquera, navegación y otros usos						150
		Recreación	40	5-10	15	Ausente	1	75
		Estuarios						75
	Suelo	Uso en riego agrícola	40	5-10	15	Ausente	NAp	NA
	Humedales naturales		40	5-10	15	Ausente	1	75
México NOM-001-SEMAR- NAT-2021	Ríos, arroyos, canales, drenes	35	6-9	15	NAp	NAp	60	
	Embalses, lagos y lagunas	35	6-9	15	----	----	20	
	Zonas marinas mexicanas	35	6-9	15	----	----	20	
	Suelo	Riego de áreas verdes						30
		Infiltración y otros riegos	35	6-9	15	NAp	NAp	100
	Cárstico						20	
México NOM-002-SEMAR- NAT-1996	Alcantarillado	40	5.5-10	50	Ausente	5	75	
México NOM-003-SEMAR- NAT-1997	Servicio al público contacto directo	NAp	NAp	15	Ausente	NAp	20	
	Servicio al público contacto indirecto	NAp	NAp	15	Ausente	NAp	30	

T: temperatura; SS: sólidos sedimentables; SST: sólidos suspendidos totales; DBO<sub>5</sub>: demanda biológica de oxígeno; NT: nitrógeno total; PT: fósforo



BRASIL, CANADÁ, UNIÓN EUROPEA, ESTADOS UNIDOS DE NORTEAMÉRICA Y MÉXICO.

DBO <sub>5</sub> (mg/L)	NT (mg/L)	PT (mg/L)	Coliformes fecales (NMP/100mL)	HH (h/L)	DQO (mg/L)	COT (mg/L)	<i>E. coli</i> (NMP/100mL)	Enterococos fecales (NMP/100mL)	Color verdadero (nm)	Toxicidad aguda (UT)
60	NAp	NAp	NAp	NAp	NAp	NAp	NAp	NAp	NAp	NAp
25	25	10	300	NAp	NAp	NAp	100	100	NAp	NAp
20	15	2	500	NAp	100	5	100	100	NAp	NAp
25	5-25	3	300	NAp	100	10	250	100	NAp	NAp
150	40	20								
75	40	20	1000-2000	1-5	NAp	NAp	NAp	NAp	NAp	NAp
40	15	5								
75	40	20	1000-2000	1-5	----	----	----	----	----	----
30	15	30								
150	NAp	NAp								
75	NAp	NAp	1000-2000	1-5	----	----	----	----	----	----
75	15	5								
NA	NAp	NAp	1000-2000	1-5	----	----	----	----	----	----
75	NAp	NAp	1000-2000	1-5	----	----	----	----	----	----
NA	25	15	NAp	NAp	150	38	250	250	436-620	2 a 15 minutos
----	15	5	---	NAp	100	25	250	250	436-620	2 a 15 minutos
----	25	15	---	NAp	85	21	250	250	436-620	2 a 15 minutos
	NAp	NAp			60	15	250	250		
---	NAp	NAp	---	1	150	35	250	250	436-620	2 a 15 minutos
	15	5			60	15	50	50		
75	NAp	NAp	NAp	NAp	NAp	NAp	NAp	NAp	NAp	NAp
20	NAp	NAp	240	1	NAp	NAp	NAp	NAp	NAp	NAp
30	NAp	NAp	1000	5	NAp	NAp	NAp	NAp	NAp	NAp

total; HH: huevos de helminto; DQO: demanda química de oxígeno; COT: carbón orgánico total; *e. coli*: *escherichia coli*.

señala los estados y municipios con excepciones. En la NN, NOM-001-SEMARNAT-2021, se eliminó el destino de humedales naturales y se incluyen cuatro destinos: ríos, arroyos, canales y drenes; embalses, lagos y lagunas; zonas marinas mexicanas y suelo. Para las primeras tres categorías se eliminaron los cuerpos receptores (A, B y C) con excepción de “suelo” donde se añadieron tres cuerpos receptores i) riego de áreas verdes ii) infiltración y otros riegos; iii) cárstico (**Cuadro I**).

La NOM-002-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1996b) sólo establece los LMP para el agua residual que tiene como destino el alcantarillado urbano o municipal. Si el agua residual tiene contacto con el público directa o indirectamente, los LMP se señalan en la NOM-003-SEMARNAT-1997 (SEMARNAT 1997).

Los otros países, Brasil, la UE, EUA y Canadá, sólo establecen un cuerpo receptor, el cual incluye a ríos, alcantarillado y cualquier cauce de agua (**Cuadro I**). Por tanto, las comparaciones con esos países hacen uso de los LMP de México para la descarga a ríos, que es el tipo de descarga similar a los países analizados. Las regulaciones en los cuatro casos reportan que se deben comparar promedios mensuales de los parámetros con los correspondientes límites máximos permisibles.

La primera diferencia entre la normatividad mexicana y la de otros países es el hecho de contar con diferentes LMP y destinos de descarga del agua residual; esto complica las comparaciones en el seguimiento y cumplimiento de las normas (Peasey et al. 2000).

Por otra parte, como se observa en el **cuadro I**, los parámetros analizados son aceites y grasas, materia flotante, SS, SST, DBO<sub>5</sub>, NT, PT, temperatura y pH. Para el parámetro temperatura, todos los países establecen como valor máximo los 40 °C, aunque la UE también considera una temperatura mínima de 12 °C.

El valor mínimo establecido para el pH es de 5 para la mayoría de los países, incluyendo a México; sin embargo, el valor máximo en México es 10 en la NA, mientras que en la NN es igual al resto de los países con un valor de 9.

La DBO<sub>5</sub> es la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para degradar la materia orgánica biodegradable existente en un agua residual. En la NA, México permite concentraciones de descarga de este parámetro superiores a las de los otros países para DBO<sub>5</sub> con un rango entre 30 y 150 mg/L. Mientras más alto sea el valor de DBO<sub>5</sub> en el agua residual, existe mayor cantidad de materia orgánica y el consumo de oxígeno en el cuerpo de agua (bien nacional de acuerdo con la norma mexicana) puede

incrementarse, teniendo como consecuencia inmediata un déficit de oxígeno disuelto y la eventual mortandad de peces y destrucción de las comunidades acuáticas que necesitan el oxígeno para vivir (Poggi-Valardo et al. 1997, Metcalf y Eddy 2003).

En la NN, el parámetro DBO<sub>5</sub> se ha eliminado y se ha añadido el parámetro demanda química de oxígeno, DQO.

Brasil y México no regulan la concentración de nitrógeno y fósforo total generados en sus aguas residuales en descargas a alcantarillado y en contacto directo o indirecto con el público. Por ejemplo, el fósforo total máximo que especifica la UE es de 3.0 mg/L y en el caso de ríos para uso público urbano y riego agrícola el LMP de PT en México para aguas nacionales es 20 mg/L (Cuadro I), y ese valor es 6.67 mayor si lo comparamos con el LMP de la NA y 8.33 mayor si se compara con el LMP correspondiente de la UE.

Correspondientemente, en la 3a. fila del **cuadro I** se observa el LMP para el mismo parámetro según las regulaciones de la UE, con un intervalo de 3 mg/L.

Además, según la información contenida en la sección A1.4 del Material complementario (Anexo 1), se establece que en general, tanto  $\alpha$  como  $\alpha'$  promedios para la comparación entre México y la UE conducen al rechazo de la hipótesis nula de igualdad de LMP, y respaldan la hipótesis alternativa que establece que ambos índices son significativamente  $> 1$  ( $\alpha = 0.05$ ) (**Cuadros A1-4.2.1 y A1-4.2.3**). Los resultados y significancia son similares para los índices derivados  $u$  y  $u'$ , que son las transformaciones logarítmicas (logaritmo natural) de  $\alpha$  y  $\alpha'$ , respectivamente.

#### **Otros contaminantes (metales pesados, As y cianuros)**

En el caso de los parámetros OC (metales pesados, As, y cianuros) los valores de sus LMP varían de acuerdo al país (**Cuadro II**). Los EUA a través de la EPA, y la UE cuentan con LMP más bajos, mientras que los países de Latinoamérica (Brasil y México) presentan LMP en algunos casos superiores hasta 40 veces ó más en comparación con los LMP de la UE.

México, en la descarga para alcantarillado NOM-003-SEMARNAT-1997 (SEMARNAT 1997) tiene la concentración más alta para Cd con 0.5 mg/L; en segundo puesto se encuentra Brasil, con una concentración de 0.2 mg/L, valores que superan 400 veces la concentración establecida en la UE (**Cuadro II**). De acuerdo con la Organización Mundial de Salud

(OMS), el Cd se acumula principalmente en los riñones y su semivida biológica en el ser humano es de 10 a 35 años (OMS 2006), por lo que este parámetro debe ser revisado en un futuro cercano, debido a que México ocupa el sexto lugar a nivel mundial en la producción de este metal (INEGI 2010), razón por la cual es importante que se encuentre en bajas concentraciones.

Por otra parte, el  $\text{CN}^-$  presentan muy bajas concentraciones permitidas en la normatividad de los EUA y la UE. En el caso de la UE, no debe haber una descarga de cianuro (**Cuadro II**), debido a que, en el 2010, el Parlamento Europeo aprobó una resolución (RC-B7-0238/2010) para prohibir el uso de cianuro en los países que la conforman. Los países de Latinoamérica, entre ellos México, presentan rangos de concentración muy altos (entre 1.0 y 2.0 mg/L), por lo que se debe replantear el cambio de rango de este contaminante.

Para el cobre, México permite que la concentración de este metal pesado en las descargas a alcantarillado sea de hasta 10 mg/L, lo que representa una concentración 10 veces mayor si la comparamos con las descargas permitidas en Brasil. Las altas concentraciones de Cu en el agua residual pueden provocar, en el ser humano, alteración del material genético y cáncer de pulmón con exposición a largo plazo (OMS 2006).

El mercurio es un contaminante muy tóxico para el ser humano y el ambiente. Los peces lo absorben en gran cantidad como metil-mercurio, el cual se acumula en ellos y en las cadenas alimenticias de las que forman parte (Londoño-Franco et al. 2016, Reyes et al. 2016), mientras que en el ser humano puede ocasionar daño renal severo al consumirlo a través de los peces contaminados por este metal. Es por ello, que el LMP para aguas residuales en la UE es muy estricto siendo su concentración máxima permisible 0.00007 mg/L o 0.07  $\mu\text{g/L}$ . Los rangos de concentración del Hg en la normatividad mexicana oscilan entre 0.01 y 0.005 mg/L, valores cercanos a los establecidos por la EPA para los EUA (**Cuadro II**).

La concentración de plomo señalada en México para la descarga de aguas residuales en suelos establece un LMP de 5.0 mg/L, el cual es 25 veces superior que el establecido para aguas de bienes nacionales, y 10 veces superior al establecido en la normatividad de Brasil.

Por otra parte, si se analizan los LMP establecidos por la EPA en EUA y la UE, se observan concentraciones muy bajas; esto tal vez se deba a los efectos tóxicos del Pb en el ser humano, como daño en el sistema nervioso y problemas mentales en los bebés

cuando hay exposición alta en la etapa prenatal (OMS 2006). Por ello, es recomendable que México considere cambios a la baja en los LMP de Pb, ya que al ser el quinto productor mundial de este metal pesado (INEGI 2010) debe prevenir la acumulación de Pb en el suelo y agua para evitar daños irreparables en la salud y el ambiente.

Respecto al zinc, los LMP en aguas residuales entre países no presentan mucha variación; por ello podemos considerar que se encuentran dentro del límite para no causar daño al ambiente y a la salud humana.

### **Cocientes (índices de permisividad) de contaminantes básicos y otros contaminantes con base en la NOM-001-SEMARNAT-1996 respecto de otros países**

Como se observa en los cuadros III y IV, se obtuvieron los cocientes a tanto para contaminantes básicos como para metales pesados y cianuros para cada destino de descarga. Los contaminantes básicos estipulados en la normatividad mexicana consideran 11 parámetros. En el caso de ríos (uso público urbano) sólo se consideraron nueve parámetros ya que en los EUA no se monitorea materia flotante y huevos de helminto (HH). Para alcantarillado se tiene registro sólo de seis parámetros ya que la normatividad mexicana no tiene concentraciones señaladas para NT, PT, coliformes fecales y HH, y como en el caso anterior, en los EUA no se monitorea materia flotante. Finalmente, si el cuerpo receptor es del tipo en que la población puede tener contacto directo con el agua residual sólo se consideran cuatro parámetros como aceites y grasas, SST,  $\text{DBO}_5$  y coliformes fecales.

Al obtener la mediana y la media aritmética de  $\alpha$  (índice de permisividad contaminante) para contaminantes básicos, se observa que los LMP en México son entre tres y cuatro veces superiores a los de EUA (**Cuadro III**), siendo la excepción aquellas aguas residuales tratadas que tendrán como destino final un servicio al público (contacto directo) donde LMP es muy similar a los correspondientes en las normas de EUA. Incluso en este apartado México cuenta con un  $\alpha = 0.48$  lo cual indica que la concentración de EUA es mayor que la de México.

Por otra parte, las normas oficiales mexicanas (NOM) establecen que se deben monitorear siete parámetros de metales pesados tales como Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn, el metaloide As y los cianuros. Para los tres destinos de descarga se debe realizar el monitoreo de estos nueve agentes químicos (**Cuadro IV**).

Al obtener los índices de permisividad contaminante ( $\alpha$ ) se observa que los LMP en México son



**CUADRO III.** COCIENTES  $\alpha$  DE CONTAMINANTES BÁSICOS ENTRE MÉXICO-BRASIL, MÉXICO-ESTADOS UNIDOS Y MÉXICO-UNIÓN EUROPEA.

	Destino de la descarga	Cantidad de parámetros	Valor mínimo	Valor máximo	Mediana	Media aritmética
México-Brasil	A	5	0.30	1.3	1.00	1.02
	B	5	1.00	5.0	1.11	<b>1.87</b>
	C	2	0.30	0.3	0.32	0.32
México-Estados Unidos	A	9	1.0	10	3	<b>3.34</b>
	B	6	1	5	4	<b>3.48</b>
	C	4	0.48	1.5	1	1.08
México-Unión Europea	A	7	1	6.67	3.00	<b>4.07</b>
	B	4	1	5	2.57	<b>2.79</b>
	C	3	0.57	0.8	0.80	<b>0.72</b>

A: Ríos con uso público urbano; B: Alcantarillado; C: Servicio al público con contacto directo

**CUADRO IV.** COCIENTES  $\alpha$  DE METALES PESADOS Y CIANUROS (OTROS CONTAMINANTES) ENTRE MÉXICO-BRASIL, MÉXICO-ESTADOS UNIDOS Y MÉXICO-UNIÓN EUROPEA.

	Destino de la descarga	Cantidad de parámetros	Valor mínimo	Valor máximo	Mediana	Media aritmética
México-Brasil	A	9	0.20	4	0.50	1.12
	B	9	0.50	10	2.00	<b>2.44</b>
	C	9	0.20	4	0.50	1.12
México-Estados Unidos	A	9	2	400	25	<b>99.20</b>
	B	9	2.5	1000	20	<b>237.91</b>
	C	9	2.5	400	9	55.77
México-Unión Europea	A	9	5	80	25.00	<b>30.37</b>
	B	9	10	200	50.00	<b>79.81</b>
	C	9	5	80	25.00	<b>30.37</b>

A: Ríos con uso público urbano; B: Alcantarillado; C: Servicio al público con contacto directo.

significativamente superiores a los de los EUA, incluso el valor mínimo de  $\alpha$  es de 2 para los tres destinos de descarga estudiados (**Cuadro IV**). Para el caso de ríos (uso público urbano) y para servicio al público (contacto directo),  $\alpha$  llega a ser 200 veces superior, mientras que  $\alpha$  para el agua residual con destino a alcantarillado es 1000 veces superior. Estas cifras indican que México tiene una altísima permisividad contaminante en comparación con los EUA.

La información anterior permite aquilatar que la normatividad mexicana de 1996 es laxa y que las

altas concentraciones en los parámetros permiten la contaminación del agua principalmente por parte de las industrias, tanto nacionales como extranjeras. Además, la presencia de metales pesados en el ambiente puede desencadenar diversos problemas, causando enfermedades pulmonares, fallas renales, e hipertensión, entre otros

### Cocientes (índices de permisividad) de contaminantes básicos y otros contaminantes con base en la NOM-001-SEMARNAT-2021 respecto de otros países

El propósito de esta sección consiste en desarrollar la comparación de las dos normas mexicanas con las normas de los EUA, la UE, Canadá y Brasil, y darles un sustento estadístico que refuerce las similitudes o diferencias encontradas. Corresponde a la “Sección A1-4. Comparación de la nueva Norma con las regulaciones de países/regiones selectas EUA, Brasil, Unión Europea y Canadá” del Material complementario.

Para el análisis estadístico se usará el Caso 2 del **cuadro A1-3.2.2.1** (donde se reúnen las dójimas de Student para una muestra).

Como se recordará, los índices de permisividad que aparecen en esta subsección han sido definidos en la Sección A1-3 como sigue (se le pone nueva numeración actualizada a esta subsección):

$$\alpha_j = \frac{LMP_{NA}}{LMP_{\text{otro país o región}}} \quad (8)$$

$$\alpha'_j = \frac{LMP_{NN}}{LMP_{\text{otro país o región}}} \quad (9)$$

y sus correspondientes variables transformadas

$$u_j = \ln \alpha_j \quad (10)$$

$$u'_j = \ln \alpha'_j \quad (11)$$

Se presentan los resultados de las dójimas en una serie de cuadros del Material complementario y se discute su sentido y significancia. El **cuadro A1-4.2.1** reúne información sobre los LMP para PCB de ambas normas para los dos subconjuntos de parámetros (PCB y OC), y para cada país muestra los LMP,  $\alpha$ ,  $\alpha'$ ,  $u$  y  $u'$ .

El **cuadro A1-4.2.2** muestra información similar para OC. El **cuadro A1-4.2.3** contiene los detalles más relevantes del análisis estadístico y los resultados. A su vez, las conclusiones conceptuales de este análisis estadístico se recopilaron en el **cuadro A1-4.2.4**.

Finalmente, el **cuadro A1-4.2.5** reúne los promedios de promedios de  $\alpha$  y  $\alpha'$ ,  $u$  y  $u'$  de las comparaciones de México con los tres países/regiones desarrolladas, a saber, EUA, UE y Canadá.

Las tendencias que emergen del estudio de los cuadros anteriormente citados se enlistan a continuación:

- En general, la permisividad de México es mayor que la de los tres países desarrollados (**Cuadro A1-4.2.5**) para PCB, y muchísimo mayor aún para OC, para ambas normas mexicanas (tanto 2021 como 1996). Es perturbadora esta tendencia pues OC contiene varios elementos reconocidamente tóxicos y se esperaría mayor severidad (menor permisividad mexicana).
- Se nota un mayor aumento de permisividad con la NN (**Cuadro A1-4.2.5**) que, con la NA, en términos de  $\bar{\alpha} < \bar{\alpha}'$ ,  $43.72 < 50.06$ , y en términos de  $\bar{u} < \bar{u}'$ ,  $2.798 < 3.11$ . Este resultado también es sorprendente, pues indica que en general no se ha ganado severidad con la NN.
- Las permisividades calculadas tanto con la NA como con la NN de México y Brasil son similares. Esto se esperaba debido a las similitudes de ambos países en términos de grado de desarrollo económico y rasgos políticos y geográficos.
- EL uso de las variables  $u$  y  $u'$  consecuentemente conduce a decisiones más contundentes que el uso de variables  $\alpha$  y  $\alpha'$  en las dójimas correspondientes; esto se nota en que en general el  $t_0$  para  $u$  ó  $u'$  es mayor que el  $t_0$  para  $\alpha$  y  $\alpha'$  (**Cuadro A1-4.2.3**.)
- En general, los resultados de las dójimas basadas en  $\alpha$  y  $\alpha'$  son congruentes con los que emanan de las dójimas con  $u$  y  $u'$  (variables transformadas). Se detecta como excepción para los EUA, OC, primera fila, hay una Aceptación de  $H_0$  debido a una desviación estándar inflada. En efecto, hay un  $\alpha = 400$  para Cu que afecta hacia arriba la desviación estándar y deprime la sensibilidad de la dójima pues baja el valor de  $t_0$ . Sin embargo, es solamente una incongruencia en 20 resultados.

Son más confiables los resultados encontrados con las variables transformadas  $u$  y  $u'$  porque mejora la sensibilidad de las dójimas para encontrar diferencias significativas cuando ellas existen.

### Cumplimiento de las normatividades mexicanas en plantas de tratamiento de México

De la muestra de resultados de promedios trimestrales de una serie de PTARM de México, se tomaron 16 parámetros que permiten evaluar la calidad del

agua residual tratada para estar en contacto directo con el público. Los parámetros correspondientes se establecen en la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1996) y la NOM-003-SEMARNAT-1997 (SEMARNAT 1997). El monitoreo se basó en muestreo simple.

Esta parte se ha revisado y completado con el Anexo 2: datos sobre las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales utilizados para analizar cumplimiento de normas de descarga en el Material complementario, al cual se remite al lector.

En el **cuadro V** se pueden observar los resultados analíticos del efluente de las 25 PTARM comparados con los LMP establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1996) y la NOM-0003-SEMARNAT-1997 (SEMARNAT 1997). El Hg y el As como se ve en la **figura 2**, son dos parámetros con un incumplimiento tipo B, debido a que no es determinado por la instancia que realiza las pruebas de calidad del agua residual en las PTARM de México, a pesar de que la NOM-001-SEMARNAT-1996 y 2021 (SEMARNAT 1996, 2021) lo especifican.

Cabe señalar que la Organización Mundial de la Salud (OMS 2006) establece que el As puede producir lesiones vasculares en el sistema nervioso y el hígado, sin que se haya demostrado que sea esencial para el ser humano.

Además, el Hg es un contaminante tóxico que a través del agua puede producir en el ser humano colitis y gastritis hemorrágicas, si bien las lesiones fundamentales son renales; mientras que, en el ambiente, los peces lo absorben en gran cantidad como metil-mercurio, que se acumula en ellos y en las cadenas alimentarias de las que forman parte (Londoño-Franco et al. 2016, Reyes et al. 2016).

Por otra parte, los parámetros NT, PT y SS no son monitoreados debido a la que la NOM-003-SEMARNAT-1997 no lo especifica.

Además, en la **figura 2** también se observa que los parámetros  $\text{CN}^-$ , Ni, materia flotante y HH no fueron monitoreados por las instancias encargadas del análisis del agua residual tratada. Esto significa que para estos parámetros no se realizan las pruebas pertinentes y a la vez se desconoce si se cumple con los LMP que establecen la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1996) y la NOM-003-SEMARNAT-1997 (SEMARNAT 1997).

El efecto nocivo de tener altas concentraciones de  $\text{CN}^-$  en el agua pueden provocar en seres vivos que el  $\text{CN}^-$  entre al organismo y obstaculice el transporte de oxígeno por los eritrocitos y se perturbe la respiración celular. Típicamente, el corazón y el cerebro son los órganos donde el consumo de oxígeno es

mayor y están más irrigados, y frecuentemente son los órganos más afectados (OMS 2006). El níquel de acuerdo con lo señalado por la OMS puede producir a corto plazo problemas en los aparatos reproductores masculino y femenino, así como mortalidad embrionaria y perinatal.

Los HH que se pueden encontrar en aguas residuales tratadas típicamente provienen de *Fasciola* spp. (*F. hepatica* y *F. gigantica*) y *Dracunculus medinensis* (dracunculo). Los HH en general ocasionan síntomas como urticaria, eritema, disnea, vómitos, prurito y mareos; mientras que los huevos de *Fasciola* típicamente provocan síntomas como dispepsia, náusea y vómito, dolor abdominal y fiebre elevada (hasta 40 °C) en la fase aguda (que puede durar de 2 a 4 meses). La fase crónica (tras meses o años de infección) puede caracterizarse por una hepatomegalia dolorosa, así como presentarse ictericia obstructiva, dolores torácicos, pérdida de peso y coledocitis en ciertos casos. Finalmente, las lesiones hepáticas, fibrosis e inflamación crónica de las vías biliares son las secuelas más importantes (OMS 2016).

La disposición final del agua residual tratada en la Ciudad de México y otras ciudades puede incluir contacto con el público por riego de áreas verdes urbanas, o por su incorporación a cuerpos de agua con los que la gente tiene contacto, por riego agrícola, entre otros. Es por ello que las organizaciones públicas y privadas encargadas de las PTARM tienen la obligación de analizar el agua residual tratada con todos los parámetros señalados por la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1996) y la NOM-002-SEMARNAT-1997 (SEMARNAT 1997).

En los resultados analíticos de las aguas residuales tratadas (**Fig. 2**) se observa que los parámetros relacionados con metales pesados tales como Cd, Cu, Cr, Pb y Zn cumplen con los LMP establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-001. Sin embargo, en casi todos los metales pesados, el valor medio del influente corresponde al mismo del efluente con excepción del Zn, el cual logra disminuir su concentración un 30.48 % del valor inicial.

Esta situación es preocupante porque significa que la tecnología y los procesos convencionales empleados en las PTARM actuales no permiten que disminuyan las concentraciones de metales pesados, lo cual puede generar en un futuro problemas en la salud pública y fuerte impacto ambiental de las aguas residuales.

Por otra parte, de los cinco contaminantes básicos medidos en la normatividad mexicana (pH, aceites y grasas, SST,  $\text{DBO}_5$  y coliformes fecales), dos

**CUADRO V. RESULTADOS ANALÍTICOS DEL EFLUENTE DE LAS 25 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES COMPARADOS CON LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES ESTABLECIDOS EN LA NOM-001-SEMARNAT-1996 Y 2021, Y LA NOM-0003-SEMARNAT-1997 (continúa).**

Norma aplicada	Parámetro	Unidad	LMP		PTARM												
			1996	2021	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
NOM-001-Semarnat-1996 y 2021	pH	UpH	5-10	6-9	6.61	7.74	8.01	7.67	7.75	7.9	7.37	7.08	7.22	7.49	7.47	6.85	
	As	mg/L	0.1	0.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	NM	NM	NM	NM	NM	
	Cd	mg/L	0.1	0.2	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	Cianuros	mg/L	1	1	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
	Cu	mg/L	4	4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Cr	mg/L	0.5	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	Hg	mg/L	0.005	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	NM	NM	NM	NM	NM
	Ni	mg/L	2	2	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
	Pb	mg/L	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Zn	mg/L	10	10	0.165	0.100	0.116	0.100	0.102	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.250
	Materia flotante		Ausente	NAP	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
	Acetates y grasas	mg/L	15	NAP	5.50	5.52	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.02	5.00
	SST	mg/L	20	NAP	27	22	41	15	15	19	17	17	15	15	73	15	20
DBO <sub>5</sub>	mg/L	20	NAP	8	6	31	6	12	16	5	5	4	42	10	4	5	
Coliformes fecales	NMP/100 mL	240	NAP	44850	5240	69500	5450	442125	124833	29375	1426	8001867	3560	1135	39350		
HH	h/L	1	NAP	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	

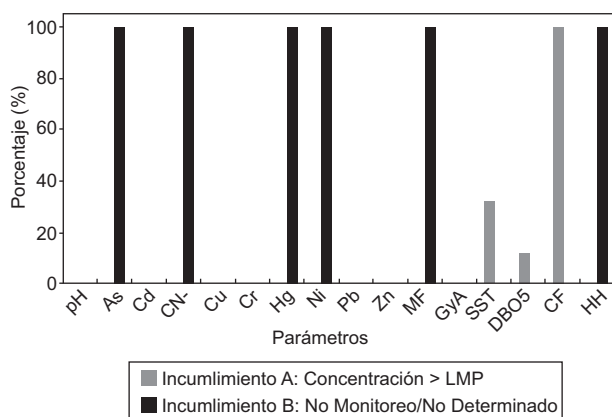
SST: sólidos suspendidos totales; DBO<sub>5</sub>: demanda biológica de oxígeno; HH: huevos de helminto; As: arsénico; Cd: cadmio; Cu: cobre; Cr: cromo; Hg: mercurio; Ni: níquel; Pb: plomo; Zn: zinc. NM: parámetro No monitoreado; ND: parámetro No determinado; NAP: No aplica



**CUADRO V. RESULTADOS ANALÍTICOS DEL EFLENTE DE LAS 25 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES COMPARADOS CON LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES ESTABLECIDOS EN LA NOM-001-SEMARNAT-1996 Y 2021, Y LA NOM-0003-SEMARNAT-1997 (continuación).**

Norma aplicada	Parámetro	Unidad	LMP 1996	2021	PTARM												
					13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
NOM-001-Semarnat-1996 y 2021	pH	UpH	5-10	6-9	7.66	7.45	7.56	7.15	6.43	7.36	7.05	7.67	7.65	6.6	7.63	8.18	7.13
	As	mg/L	0.1	0.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	NM	NM	NM	NM	NM	NM
	Cd	mg/L	0.1	0.2	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	Cianuros	mg/L	1	1	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
	Cu	mg/L	4	4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Cr	mg/L	0.5	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	Hg	mg/L	0.005	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	NM	NM	NM	NM	NM
	Ni	mg/L	2	2	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
	Pb	mg/L	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Zn	mg/L	10	10	0.163	0.329	0.352	0.100	0.137	0.112	0.100	0.133	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
NOM-003-Semarnat-1997 Alcantarillado	Materia flotante	-	Ausente	NAp	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
	Acetres y grasas	mg/L	15	NAp	5.00	5.00	5.00	5.00	5.09	5.00	5.00	5.00	5.00	8.89	5.04	5.00	5.22
	SST	mg/L	20	NAp	15	37	15	20	16	15	18	15	15	61	15	17	15
	DBO5	mg/L	20	NAp	1	14	4	7	5	3	5	4	2	106	2	4	10
	Coliformes fecales	NMP/100 mL	240	NAp	1600	10000	6750	23168	41000	2650	6483	6243	450	10975000	280	7453	27550
HH	h/L	1	NAp	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	

SST: sólidos suspendidos totales; DBO5: demanda biológica de oxígeno; HH: huevos de helminto; As: arsénico; Cd: cadmio; Cu: cobre; Cr: cromo; Hg: mercurio; Ni: níquel; Pb: plomo; Zn: zinc. NM: parámetro No Monitoreado; ND: parámetro no determinado; NAp: No aplica



**Fig. 2.** Plantas de tratamientos de aguas residuales municipales de una muestra de 25 que incumplen con los Límites Máximos Permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1996) y la NOM-0003-SEMARNAT-1997 (SEMARNAT 1997).

NOTAS: <sup>1</sup>Respecto a la norma nueva 2021 se cumple con los parámetros el pH, As, Cd, CN<sup>-</sup>, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Zn; se omite figura.

2 As: arsénico, Cd: cadmio, CN<sup>-</sup>: cianuros, Cu: cobre, Cr: cromo, Hg: mercurio, Ni: níquel, Pb: plomo, Zn: zinc, MF: materia fecal, GyA: grasas y aceites, SST: sólidos suspendidos totales, DBO<sub>5</sub>: demanda biológica de oxígeno, CF: coliformes fecales, HH: huevos de helminto

parámetros tienen un incumplimiento tipo A, esto quiere decir que la concentración del parámetro es superior al LMP señalado en la normatividad mexicana.

Uno de los parámetros que requiere reducir su concentración son los SST, ya que un 32 % de las PTARM no cumplen con este parámetro. De acuerdo con Metcalf y Eddy (2003) la presencia de una alta concentración de este SST significa la sedimentación y azolvamientos en cuerpos receptores y conducciones; así como la liberación de materia orgánica e inorgánica al destino de descarga del agua residual tratada.

Por otra parte, el 100 % de las PTARM no cumple con el valor de las coliformes fecales llegando a ser su concentración hasta 45 000 veces mayor que el valor establecido en la NOM-003-SEMARNAT-1997 (SEMARNAT 1997) que es de 240 NMP/100 mL como se observa en el **cuadro V**, PTAR 22. De acuerdo con lo señalado por la OMS, las coliformes fecales por sí mismas no constituyen una amenaza para la salud, pero su alta concentración puede indicar la presencia de microorganismos nocivos. También, hay especies de coliformes fecales que pueden ser patógenas oportunistas. Las enfermedades asociadas a coliformes fecales y microfauna acompañante son variables, desde una gastroenteritis leve a diarrea grave que en

la mayoría de los casos es mortal, así como provocar hepatitis y fiebre tifoidea. Por esta razón, el tener un parámetro con esos niveles de descarga representa un grave problema en la calidad del agua residual tratada tanto para los cuerpos receptores como para las personas que tengan contacto con ella.

Uno de los objetivos principales de tratar las aguas residuales es evitar la contaminación con metales pesados y microorganismos en los cuerpos de agua a los que son vertidos, entre otros Sin embargo, si los procesos de tratamiento, la tecnología y la infraestructura empleada en las PTARM es inapropiada y deficiente, disminuye la calidad del agua residual tratada, lo que dificulta el cumplimiento de los parámetros establecidos en la normatividad mexicana (Spiller 2017, WWAP 2017).

Finalmente, el gobierno mexicano ha hecho esfuerzos por incrementar la cobertura de agua residual tratada para lograr la meta establecida en el Plan Nacional Hídrico 2013-2018 de tratar el 60 % de las aguas residuales recolectadas; sin embargo, se ha enfocado principalmente en la creación de nuevas PTARM, y no sobre el monitoreo de las que actualmente están en operación, esto con el fin de evaluar el cumplimiento de las normas vigentes, NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997 (SEMARNAT 1996, 1996b, 1997) y verificar que el agua residual tratada que se descarga en los cauces de agua no afectará al ser humano ni al ambiente.

## CONCLUSIÓN

Primeramente, se concluirá sobre la nueva norma 2021 y su comparación con la norma anterior 1996 que todavía está vigente al momento de enviar este artículo.

- En lo que concierne a la descarga a ríos el número total de PCB pasó de 11 a 12 para las normas 1996 y 2021, respectivamente. Los parámetros contaminantes básicos cuyo LMP bajó en la NN fueron cinco (T, pH, SST, NT y PT). Los porcentajes de reducción de los LMP incluidos en la NN oscilan entre el 12 y el 38 %, dependiendo del parámetro. Es decir, no es una reducción significativa.
- El número de parámetros OC para la descarga en ríos se mantiene en nueve, y ninguno de los parámetros de la Norma 1996 fueron eliminados, pero tampoco se añadieron nuevos contaminantes. Cuatro parámetros OC (44 %) subieron sus LMP en la Norma 2021, a saber, As, Cd, Cu y Hg con porcentajes de 100 % respecto a los LMP de la NA.

- En la descarga a suelos, el número de parámetros de OC se mantiene en nueve. Ninguno de los parámetros de la NN fueron eliminados y tampoco se agregaron nuevos parámetros al subconjunto de otros contaminantes. Los LMP de los parámetros As, Cd, Pb y cianuros se redujeron en proporciones del 50 %.
- Estadísticamente, no hay un efecto virtuoso general de la NN, es decir, **ésta** baja la permisividad en todos los casos en comparación con la NA. El efecto depende del tipo de subconjunto de parámetros contaminantes y del tipo de descarga. Así, y lamentablemente, la NN es más permisiva que la NA para los casos PCB-descarga a suelos y OC-descarga a ríos.
- Hay un fuerte efecto distintivo de permisividad entre subconjuntos de contaminantes (OC vs PCB) para la descarga a ríos. La permisividad en OC es en general un 75 % mayor que la de PCB en la descarga a ríos. Es un efecto preocupante porque en OC hay agentes reconocidamente tóxicos. Entonces, la NN no estaría cumpliendo su cometido de ser más severa que la NA. Por otro lado, para la descarga a suelos, no se encontró diferencia estadística significativa entre las dos normas.

Respecto a la comparación de las normatividades mexicanas de 1996 y 2021 con las de países y regiones selectas se tiene que:

- En general, la permisividad de México es mayor que la de los tres países/regiones desarrollados (EUA, UE, Canadá) para PCB, y muchísimo mayor aún para OC. Es perturbadora esta tendencia pues el subconjunto OC contiene varios elementos reconocidamente tóxicos y se esperaría mayor severidad (menores LMP mexicanos y una armonización consecuente con la normatividad internacional).

Se nota un aumento de permisividad en la NN en relación con la NA en la comparación con otros países. En efecto, en términos de coeficientes de permisividad y sus promedios, se tiene que  $\bar{\alpha} < \bar{\alpha}'$ ,  $43.72 < 50.06$ , y en términos de  $\bar{u} < \bar{u}'$ ,  $2.798 < 3.11$  en la descarga a ríos, para la NA y la NN, respectivamente. Este resultado también es sorprendente, pues indica que en general no se ha ganado severidad con la NN. Sin embargo, las permisividades calculadas tanto con la NA como con la NN de México y Brasil son similares ( $p > 0.05$ ).

- El uso de las variables  $u$  y  $u'$  consecuentemente conduce a decisiones más contundentes que el uso de variables  $\alpha$  y  $\alpha'$  en las dósimas correspondientes. En general, los resultados de las dósimas

basadas en  $\alpha$  y  $\alpha'$  son congruentes con los que emanan de las dósimas con  $u$  y  $u'$  (variables transformadas). Los resultados encontrados con  $u$  y  $u'$  son más confiables porque aumenta la sensibilidad de las dósimas.

- Después de 25 años de revisiones de las normas NN y NA, no se han añadido regulaciones para nuevos parámetros tóxicos o potencialmente tóxicos en el subconjunto de OC. Los LMP de los PCB en la NN no se hacen significativamente más severos. Se eliminaron parámetros selectos de PCB y se añadieron otros (como toxicidad) en la NN, pero el número de parámetros PCB total quedó casi igual.

Respecto al cumplimiento de los LMP de las descargas de las PTARM establecidos en las Normas de México (incluida la NN), se tomaron 16 parámetros de la muestra de resultados analíticos trimestrales que permiten evaluar la calidad del agua residual tratada. Este tipo de efluente se utiliza para estar en contacto directo con el público y los LMP de los parámetros se establecen en la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997 para la NA y la NOM-001-SEMARNAT-2021 y la misma NOM-003 anterior.

En los parámetros comunes entre las normas 1996 y 2021, las PTARM o no monitorean, o cumplen con los LMP de parámetros monitoreados que aparecen en el primer bloque del **cuadro A2-2.1**, en ambas versiones de las normas (NA y NN).

Con respecto a los parámetros de la NOM-003 (segundo bloque del **Cuadro A2-2.1**) no aparecen en la norma 2021 y los LMP de la NOM-003 no se han actualizado (se considera también NA, pero sin cambios futuros en vigencia). Entonces, enfocándonos sobre el cumplimiento con la NA, uno de los parámetros que requiere reducir su concentración son los SST, ya que un 32 % de las PTARM no cumplen con este parámetro.

Por otra parte, el 100 % de las PTARM no cumple con coliformes fecales llegando a ser su concentración hasta 45 000 veces mayor que el valor establecido en la NOM-003-SEMARNAT-1997, 240 NMP/100 mL (SEMARNAT 1997).

La calidad de los efluentes en las PTARM analizadas de México cumple con 60 % de los LMP que establecen las normas oficiales mexicanas para los parámetros contaminantes que aparecen en 1996 y 2021. Sin embargo, existen parámetros que no son monitoreados ni determinados, lo que crea incertidumbre en cuanto al diagnóstico de la calidad del agua tratada y el reúso del agua.

Se recomienda la actualización y expansión de las NOM 002 y 003, y eventualmente la revisión de

la NOM 001 2021 para eliminar o reducir el riesgo para la salud y el ambiente de los contaminantes del agua y homologar la calidad del recurso agua en el contexto de los países integrantes del T-MEC.

Por ello, las autoridades encargadas del agua también deben considerar que el objetivo de la normatividad existente es eliminar o reducir el riesgo de los contaminantes. Además de los esfuerzos por incrementar la cobertura de agua residual tratada deben aumentar los dedicados a monitorear la calidad de los efluentes tratados. Con un correcto monitoreo en las PTARM y una actualización de la normatividad existente, México podría lograr en un futuro mediato un agua residual tratada de calidad.

### Material complementario

La información auxiliar para ayudar a la interpretación de este artículo está disponible en: <https://www.revistascca.unam.mx/rica/MaterialSuplementario/54362-Dominguez-MatCom.pdf>

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Dra. Sandra Gómez Arroyo (Editora en Jefe), al M. en E. Claudio M. Amescua-García (Editor Ejecutivo) y a la M. en C. Irene Romero-Nájera (Editora Asistente), así como a los revisores anónimos de la RICA por su orientación y comentarios que permitieron mejorar significativamente nuestro manuscrito. Uno de los autores (Dra. Lilian Edith Domínguez Montero) agradece al Consejo Nacional de la Ciencia y la Tecnología por una beca doctoral y la beca de estancia Posdoctoral por México 2022-2023 para la realización de esta investigación.

## NOTACIÓN

AR	aguas residuales.
COT	carbón orgánico total.
DBO <sub>5</sub>	demanda biológica de oxígeno.
df	grados de libertad.
DQO	demanda química de oxígeno.
DR	descarga a ríos ó ríos et al.
DS	descarga a suelos.
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i> .
H <sub>0</sub>	hipótesis nula.
H <sub>1</sub>	hipótesis alternativa.
HH	huevos de helminto.
LMP	límites máximos permisibles, aunque ahora se llaman límites permisibles en la norma 2021.
LMP <sub>NA</sub>	límites máximos permisibles norma antigua o anterior o norma 1996 o NOM-001-SEMARNAT-2021.

LMP <sub>NN</sub>	límites máximos permisibles norma nueva o norma 2021 o NOM-001-SEMARNAT-2021.
NA	norma antigua o anterior o norma 1996 o NOM-001-SEMARNAT-1996.
NAP	no aplica.
NN	norma nueva o norma 2021 o NOM-001-SEMARNAT-2021.
NOM	Norma Oficial Mexicana.
NT	nitrógeno total.
OC	otros contaminantes.
PCB	parámetros contaminantes básicos.
PT	Fósforo total.
PTAR	planta de tratamiento de aguas residuales.
PTARM	planta de tratamiento de aguas residuales municipales.
SS	sólidos sedimentables.
SST	sólidos suspendidos totales.
T	temperatura.
TAR	tratamiento de aguas residuales.
t <sub>c</sub>	valor crítico del estadígrafo t-Student.
t <sub>o</sub>	valor del estadígrafo de prueba (observado o experimental) para la dócima t-Student.
T <sub>+</sub>	estadígrafo de prueba para dócima de Wilcoxon unilateral caso 1.
T <sub>-</sub>	estadígrafo de prueba para dócima de Wilcoxon unilateral caso 2.
T <sub>min</sub>	min (T <sub>+</sub> , T <sub>-</sub> ), estadígrafo de prueba para dócima de Wilcoxon bilateral caso 3.
u	variables transformadas del cociente entre el límite máximo permisible en norma antigua mexicana y el límite máximo permisible en otro país o región.
u'	variables transformadas del cociente entre el límite máximo permisible en norma nueva mexicana y el límite máximo permisible en otro país o región.
u''	variables transformadas del cociente entre el límite máximo permisible en norma nueva y el límite máximo permisible en norma antigua.
UE	Unión Europea.

### Caracteres griegos

$\alpha$	probabilidad del error de tipo I, para el cual usaremos símbolo alfa en negrilla y cursiva.
$\alpha$	razón o cociente entre límites máximos permisibles de un parámetro contaminante con numerador para México y denominador para otro país; también denominado índice de permisividad.
$\alpha'$	razón o cociente entre límites máximos permisibles de un parámetro.
$\alpha''$	cociente entre el límite máximo permisible en norma nueva y el límite máximo permisible en norma antigua.
$\bar{\alpha}$	promedio de los promedios de $\alpha$ de la comparación México con países desarrollados.
$\bar{\alpha}'$	promedio de los promedios de $\alpha'$ de la comparación México con países desarrollados.

### Subíndices

c	crítico, delimita regiones de aceptación y rechazo en dócimas de hipótesis.
df	grados de libertad.
mg	media geométrica de un conjunto de datos.
o	valor observado para parámetro de dócima de hipótesis.

## REFERENCIAS

- Akhmouch A. y Clavreul D. (2016). Stakeholder engagement for inclusive water governance: “Practicing what we preach” with the OECD water governance initiative. *Water* 8 (5), 204. <https://doi.org/10.3390/w8050204>
- Allaoui M., Schmitz T., Campbell D. y de la Porte A. C. (2015). Good practices for regulating wastewater treatment: Legislation, policies and standards [en línea]. <https://www.unep.org/resources/report/good-practices-regulating-wastewater-treatment-legislations-policies-and-standards> 21/05/2023
- ATSDR (2004). Reseña toxicológica del cobalto. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EUA, Servicio de Salud Pública. Atlanta, EUA, 2 pp.
- ATSDR (2008). Reseña toxicológica del aluminio. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EUA, Servicio de Salud Pública. Atlanta, EUA, 2 pp.
- ATSDR (2022). ToxFAQs. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades [en línea]. [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phsindex.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phsindex.html) 21/05/2021
- Burian S. J., Nix S. J., Pitt R. E. y Durrans S. R. (2000). Urban wastewater management in the United States: past, present, and future. *Journal of Urban Technology* 7 (3), 33-62. <https://doi.org/10.1080/713684134>
- Cano A., Cañizares P., Barrera-Díaz C., Sáez C. y Rodrigo M. A. (2012). Use of conductive-diamond electrochemical-oxidation for the disinfection of several actual treated wastewaters. *Chemical Engineering Journal* 2 (11), 463-469. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.09.071>
- Carmona-Lara M.C. (2008). La Constitución y el agua: apuntes para la gobernabilidad en el caso del agua en México. En: Agua: aspectos constitucionales (C.B. Arriaga y E.O. Rabasa, Eds.). Universidad Nacional Autónoma de México, México, pp. 83-140 <http://ru.juridicas.unam.mx:80/xmlui/handle/123456789/11511> 21/05/2023
- CEDRSSA (2022). Tratado entre México, Estados Unidos y Canadá, T-MEC Capítulo 24 Medio Ambiente [en línea]. [http://www.cedrssa.gob.mx/post\\_tratado\\_entre\\_mexico\\_estados\\_unidos\\_y\\_canadno\\_-\\_n-t-mec-n-\\_capn-tulo\\_24\\_-n-medio\\_ambiente-n.htm](http://www.cedrssa.gob.mx/post_tratado_entre_mexico_estados_unidos_y_canadno_-_n-t-mec-n-_capn-tulo_24_-n-medio_ambiente-n.htm) 21/05/2023
- Cole M. A. (2004). US environmental load displacement: examining consumption, regulations, and the role of NAFTA. *Ecological Economics* 48 (4), 439-450. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2003.10.016>
- Conagua (2008). Programa Nacional Hídrico 2007-2012. Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México, México, 158 pp.
- Conagua (2013). Programa Nacional Hídrico 2014-2018. Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México, México, 139 pp.
- Conagua (2017). Situación del subsector de agua potable, alcantarillado y saneamiento: edición 2016. Comisión Nacional del Agua. CdMx, México, 85 pp.
- Conagua (2018). Situación del subsector de agua potable, alcantarillado y saneamiento: edición 2017. Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México, México, 87 pp.
- Conagua (2019). Situación del subsector de agua potable, alcantarillado y saneamiento: edición 2018. Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México, México, 88 pp.
- Conagua (2020). Situación del subsector de agua potable, alcantarillado y saneamiento: edición 2019. Comisión Nacional del Agua. Manual. Ciudad de México, México, 91 pp.
- Conagua (2021). Situación del subsector de agua potable, alcantarillado y saneamiento: edición 2020. Comisión Nacional del Agua. Manual. Ciudad de México, México, 90 pp.
- Conagua (2022). Situación del subsector de agua potable, alcantarillado y saneamiento: edición 2021. Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México, México, 93 pp.
- Daniel W.W. (2014). Bioestadística: base para análisis de las ciencias de la salud. 4ta ed, Limusa-Wiley, Ciudad de México, México, 207 pp.
- DM (2023). Foreign direct investment (US million). Data Mexico. [en línea]. <https://datamexico.org/es/explore?profile=country> 21/05/2023
- de la Peña M.E., Ducci J. y Zamora V. (2013). Tratamiento de aguas residuales en México. Banco Interamericano de Desarrollo. D.F., México, 42 pp.
- Directiva (1991). Directiva 91/271/CEE sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Consejo de las Comunidades Europeas. Official Journal of the European Communities. 21 de mayo de 1991.
- Directiva (2020). Directiva 2020/741/UE en cuanto a las sustancias prioritarias en el ámbito de la política de aguas. Consejo de las Comunidades Europeas. Official Journal of the European Communities, Unión Europea. 25 de mayo de 2020
- Domínguez-Montero L. E., Poggi-Varaldo H. M., Pérez-Angón M. Á., Jiménez-Cisneros B., Villanueva R. O. C., Caffarel-Méndez S. y Garduño E. F. (2017). Instrumentos tecnológicos patentados en México para tratar aguas residuales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 33, 43-51. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.04>
- Doria M. y Igartua C. (2018). Elaboración de una definición regional de gestión integrada de recursos hídricos

- para América Latina y el Caribe. *Aqua Lac* 10, 103-09. <https://doi.org/10.29104/phi-2018-aqualac-v10-n2/09>
- ECCC (2020). Sewer use program: guide for discharging wastewater from industrial facilities. environment and climate change Canada, Ottawa, Canada, 5 pp.
- EPA (2010). National pollutant discharge elimination system. Environmental Protection Agency. Washington, D.C., EUA, 12 pp.
- EPA (2016). Office of wastewater management: 2015-2016. Annual report. Environmental Protection Agency. Reporte. Washington, D.C., EUA, 22 pp.
- EPA (2017). Office of wastewater management: 2017 Annual report. Environmental Protection Agency. Washington, D.C., EUA, 22 pp.
- EPA (2018). Office of wastewater management: 2018 Annual report. Environmental Protection Agency. Washington, D.C., EUA, 22 pp.
- EPA (2020). Office of wastewater management: 2019 Annual report. Environmental Protection Agency. Washington, D.C., EUA, 22 pp.
- EPA (2021). Office of wastewater management: 2020 Annual report. Environmental Protection Agency. Washington, D.C., EUA, 21 pp.
- EPA (2022). Office of wastewater management: 2021 Annual report. Environmental Protection Agency. Washington, D.C., EUA, 24 pp.
- Gutiérrez C. (2008). Standards and thresholds for wastewater discharges in Mexico. En: Standards and thresholds for impact assessment (M. Schmidt, J. Glasson, L. Emmelin and H. Helbron, Eds.). Springer, Berlin, Heidelberg. Alemania, pp. 113-124. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-31141-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-31141-6_9)
- Hantke-Domas M. y Jouravlev A. (2011). Lineamientos de política pública para el sector de agua potable y saneamiento. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile, Chile, 58 pp.
- Husted B. W. y Logsdon J. M. (1997). The impact of NAFTA on Mexico's environmental policy. *Growth and Change* 28(1), 24-48. <https://doi.org/10.1111/1468-2257.00048>
- INEGI (2010). Censo de México en la producción mundial de minerales [en línea]. <http://cuentame.inegi.org.mx/economia/secundario/mineria/default.aspx?tema=E> 21/05/2023
- Jiménez B. (2006). Irrigation in developing countries using wastewater. *International Reviews on Environmental Strategies* 6 (2), 229-250.
- Jiménez B., Durán J. y Méndez J. (2010). Calidad. En: El agua en México: cauces y encauces (B. Jiménez, M., Torregrosa y L. Aboites, Eds.). Academia Mexicana de Ciencias. Ciudad de México, México, pp. 265-290.
- Kreyszig E. (1970). *Introductory mathematical statistics*. John Wiley and Sons Ltd, Nueva York, EUA. 380 pp.
- Londoño-Franco L. F., Londoño-Muñoz P. T. y Muñoz-García F. G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 10 (2), 145-153. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153)
- Mercado A. y Blanco M. L. (2003). Las normas oficiales mexicanas ecológicas para la industria mexicana: alcances, exigencia y requerimientos de reforma. *Gestión y Política Pública* 12 (1), 93-128.
- Metcalf and Eddy Inc., Tchobanoglous G., Burton F. L., Tchuihashi R. y Stensel H. D. (2013). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery*. 5a. ed., McGraw-Hill Professional, Nueva York, EUA, 1819 pp.
- MMA (2011). Resolução No 430 Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357. Ministério do Meio ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente, Brasil. 13 de mayo de 2011.
- Montgomery D.C. (1997). *Design and analysis of experiments*. 4a. ed, John Wiley and Sons Ltd, Nueva York, EUA, 723 pp.
- Nageler-Petritz H. (2022). Baby, you can recycle my car! Can you?. *Waste Management World* 23 (2), 12-16.
- OMS (2006). Guías para la calidad del agua potable. Vol. 1: Recomendaciones. Organización Mundial de la Salud [en línea]. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/37736>. 21/05/2023
- OCDE (2023). Wastewater treatment (indicator). Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [en línea] <https://data.oecd.org/water/wastewater-treatment.htm> 21/05/2023
- Peasey A., Blumenthal U., Mara D. y Ruiz-Palacios G. (2000). A review of policy and standards for wastewater reuse in agriculture: A Latin America perspective. *Water and Environmental Health at London and Loughborough*, Londres, Reino Unido, 68 pp.
- Poggi-Varaldo H. M., Gutiérrez-Saravia A., Fernández-Villagómez G., Martínez-Pereda P. y Rinderknecht-Seijas N. (2002). A full-scale system with wetlands for slaughterhouse wastewater treatment. *Wetlands and Remediation II*. Battelle, 2nd. International Conference on Wetlands and Remediation pp. 213-223.
- Poggi-Varaldo H. M., Rodríguez-Vázquez R., Fernández-Villagomez G. y Esparza-García F. (1997). Inhibition of mesophilic solid-substrate anaerobic digestion by ammonia nitrogen. *Applied Microbiology and Biotechnology* 47 (3), 284-291. <https://doi.org/10.1007/s002530050928>
- Qian L., Wang S., Xu D., Guo Y., Tang X. y Wang L. (2016). Treatment of municipal sewage sludge in supercritical water: a review. *Water Research* 89, 118-131. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.047>

- Ramón L.V. (2010). Infraestructura sustentable: Las plantas de tratamiento de aguas residuales. *Quivera* 12, 58-69
- Reyes Y., Vergara I., Torres O., Díaz-Lagos M. y González-Jiménez E. E. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo* 16 (2), 66-77.
- Romero-Aguilar M., Colín-Cruz A., Sánchez-Salinas E. y Ortiz-Hernández M. L. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 25, 157-167.
- Salgado-Bernal I., Durán-Domínguez C., Cruz-Arias M., Carballo-Valdés M. E. y Martínez-Sardiñas A. (2013). Bacterias rizosféricas con potencialidades fisiológicas para eliminar materia orgánica de aguas residuales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 28, 17-26.
- Sawyer C., Mc Carthy P. y Parkin, G. (2003) *Chemistry for environmental engineering and science*. 5a. ed., Mc Graw-Hill, Nueva York, EUA, 752 pp.
- SCFI (2015). Norma Mexicana NMX-AA-042-SCFI-2015. Análisis de agua-enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y *Escherichia coli*-método del número más probable en tubos múltiples. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Diario Oficial de la Federación, México. 18 de abril de 2016.
- SCFI (2015b). Norma Mexicana NMX-AA-042-SCFI-2015. Que establece los requisitos y especificaciones de sustentabilidad de calidad de playas. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Diario Oficial de la Federación, México. 07 de diciembre de 2016.
- SEMARNAT (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Diario Oficial de la Federación, México. 24 de junio de 1996.
- SEMARNAT (1996b). Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Diario Oficial de la Federación, México. 3 de junio de 1998.
- SEMARNAT (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Diario Oficial de la Federación, México. 21 de septiembre de 1998.
- SEMARNAT (2021). Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997. Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Diario Oficial de la Federación, México. 11 de marzo de 2021.
- SoeS (2021). *L'économie de l'environnement en 2012: Rapport de la commission des comptes et de l'économie de l'environnement*. Service de l'Observation et des Statistiques. Paris, Francia, 141 pp.
- SNIS (2017). Diagnóstico dos serviços de água e esgotos- 2016. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Brasília, Brasil, 224 pp.
- SNIS (2018). Diagnóstico dos serviços de água e esgotos- 2017. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Brasília, Brasil, 226 pp.
- SNIS (2019). Diagnóstico dos serviços de água e esgotos- 2018. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Brasília, Brasil, 224 pp.
- SNIS (2020). Diagnóstico dos serviços de água e esgotos- 2019. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Brasília, Brasil, 225 pp.
- SNIS (2021). Diagnóstico dos serviços de água e esgotos- 2020. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Brasília, Brasil, 224 pp.
- SNIS (2022). Diagnóstico dos serviços de água e esgotos- 2021. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Brasília, Brasil, 226 pp.
- Spiller M. (2017). Measuring adaptive capacity of urban wastewater infrastructure. Change impact and change propagation. *Science of the Total Environment* 601-602, 571-579. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.161>
- UNEP, WHO, HABITAT y WSSCC (2004). Lineamientos sobre el manejo de aguas residuales municipales. United Nations Environment Programme, World Health Organization, United Nations Human Settlements Programme and Water Supply and Sanitation Collaborative Council. Manual. La Haya, Países Bajos, 112 pp.
- UNEP/WHO/HABITAT/WSSCC: Lineamientos sobre el manejo de aguas residuales municipales. UNEP/GPA Oficina de Coordinación, La Haya, Países Bajos (2004).
- WBG (2023). GDP (constant 2015 US\$). World Bank Group [en línea]. <https://data.worldbank.org/indicador/NY.GDP.MKTP.KD> 21/05/2023
- WBG (2023d). Population. World Bank Group [en línea]. <https://data.worldbank.org/indicador/SP.POP.TOTL> 21/05/2023

WWAP (2012). The United Nations World Water Development Report 4: Managing water under uncertainty and risk. World Water Assessment Programme. Paris, Francia, 407 pp.

WWAP (2017). The United Nations World Water Development Report 2017. wastewater: the untapped resource. United Nations World Water Assessment Programme. Paris, Francia, 180 pp.

Zurita F., Roy E. D. y White J. R. (2012). Municipal wastewater treatment in Mexico: Current status and opportunities for employing ecological treatment systems. *Environmental Technology* 33 (10), 1151-1158. <https://doi.org/10.1080/09593330.2011.610364>