

Medición de drogas ilícitas en aguas residuales: estudio piloto en México

Copytzy Cruz-Cruz, D en C,⁽¹⁾ Desireé Vidaña-Pérez, M en C,⁽¹⁾ Manuel Mondragón y Kalb, MC,⁽²⁾ María José Martínez-Ruiz, M en Psic,⁽²⁾ Gustavo Olaiz-Fernández, M en SP,⁽³⁾ Luis Fernando Hernández-Lezama, M en Admon,⁽⁴⁾ Mauricio Hernández-Ávila, D en C,⁽⁵⁾ Tonatiuh Barrientos-Gutiérrez, MD, PhD.⁽¹⁾

Cruz-Cruz C, Vidaña-Pérez D, Mondragón y Kalb M, Martínez-Ruiz MJ, Olaiz-Fernández G, Hernández-Lezama LF, Hernández-Ávila M, Barrientos-Gutiérrez T.
Medición de drogas ilícitas en aguas residuales: estudio piloto en México
Salud Publica Mex. 2019;61:461-469.
<https://doi.org/10.21149/9819>

Resumen

Objetivo. Monitorear el consumo de drogas a través de la medición de sus metabolitos en aguas residuales. **Material y métodos.** Se obtuvieron muestras de 31 plantas de tratamiento de agua residual y de 95 sitios con poblaciones específicas (38 escuelas, 42 unidades de tratamiento de adicciones y 15 centros de readaptación social). Usando cromatografía líquida de ultra-alta resolución, se midieron nueve metabolitos de seis drogas. **Resultados.** Ocho de nueve metabolitos de drogas fueron identificados en aguas residuales. Los metabolitos de marihuana (THC-COOH), cocaína (benzoilecgonina) y metanfetamina fueron identificados en escuelas, centros de readaptación social y de tratamiento de adicciones. En Nuevo Laredo, Culiacán y Torreón se encontraron los consumos per cápita más elevados de cocaína, marihuana, anfetamina y metanfetamina. **Conclusiones.** El monitoreo del uso de drogas a través de aguas residuales es factible en México y podría constituir un sistema de vigilancia para identificar cambios de su consumo en el tiempo.

Palabras clave: drogas ilícitas; epidemiología; aguas residuales; México

Cruz-Cruz C, Vidaña-Pérez D, Mondragón y Kalb M, Martínez-Ruiz MJ, Olaiz-Fernández G, Hernández-Lezama LF, Hernández-Ávila M, Barrientos-Gutiérrez T.
Assessing illicit drugs in wastewater: a pilot study in Mexico.
Salud Publica Mex. 2019;61:461-469.
<https://doi.org/10.21149/9819>

Abstract

Objective. Monitor drug use through wastewater metabolite measurement. **Materials and methods.** Wastewater samples were obtained from 31 wastewater treatment plants and 95 sites with specific populations (38 schools, 42 units of addiction treatment and 15 penitentiaries). Using ultra high liquid chromatography, we measured nine metabolites from six drugs. **Results.** Eight out of nine drug metabolites were identified in the samples. Marijuana (THC-COOH), cocaine (benzoylecgonine) and methamphetamine were identified in schools, centers of addiction treatment and penitentiaries. Nuevo Laredo, Culiacan and Torreon had the highest consumption of cocaine, marijuana, amphetamine and methamphetamine. **Conclusions.** Monitoring drug use through wastewater is feasible in Mexico and could constitute a surveillance system to identify changes in the time.

Keywords: street drugs; epidemiology; wastewater; Mexico

- (1) Centro de Investigación en Salud Poblacional, Instituto Nacional de Salud Pública. Cuernavaca, México.
- (2) Comisión Nacional contra las Adicciones. Ciudad de México, México.
- (3) Centro de Investigación en Políticas, Población y Salud, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
- (4) Investigación, Ciencia y Tecnología Internacional. Ciudad de México, México.
- (5) Centro Universitario de los Altos, Universidad de Guadalajara. Guadalajara, México.

Fecha de recibido: 11 de junio de 2018 • **Fecha de aceptado:** 29 de octubre de 2018
 Autor de correspondencia: Dr. Tonatiuh Barrientos-Gutiérrez. Av. Instituto Nacional de Salud Pública.
 Av. Universidad 655, col. Santa María Ahuacatlilán. 62100 Cuernavaca, Morelos, México.
 Correo electrónico: tbarrientos@insp.mx.

El consumo de drogas ilícitas en México se ha incrementado rápidamente en población de 12 a 65 años, al pasar de 1.6% en 2008 a 2.9% en 2016-2017.¹ Si bien este incremento ha ocurrido en todas las drogas, los cambios más pronunciados se han observado en marihuana y cocaína.¹ El cambio acelerado en el consumo de drogas requiere de monitoreo constante y cercano, que permita adecuar las acciones de salud pública a las necesidades de la población usuaria y redefinir las acciones preventivas para hacerlas más eficaces.²

Actualmente, la principal fuente de monitoreo del consumo de drogas son las encuestas poblacionales. En México, la Encuesta de Consumo de Drogas, Alcohol y Tabaco (Encodat) 2016-2017 recaba información a profundidad de consumo de drogas cada cinco años.¹ Los datos obtenidos con la Encodat hacen de este instrumento una fuente fundamental de información para definir prevalencias y evaluar factores de riesgo.¹ Sin embargo, las encuestas poblacionales tienen al menos tres limitaciones en el monitoreo del consumo de drogas.^{3,4} La primera es su realización poco frecuente, lo que reduce su utilidad para evaluar los cambios en el consumo a corto plazo.^{4,5} En segundo lugar, su levantamiento en hogares reduce la posibilidad de obtener representatividad de grupos vulnerables específicos, como la población de centros penitenciarios, centros de tratamiento y sin lugar fijo de residencia.⁶ Finalmente, las encuestas pueden tener limitaciones en la validez de la información derivadas del estigma social que existe en torno al consumo.^{4,7} Considerando lo anterior, existe la necesidad de desarrollar métodos alternativos para vigilar el consumo de drogas, y un enfoque prometedor es el monitoreo en aguas residuales.⁸

El monitoreo en aguas residuales ha sido utilizado en varios países y permite estimar el uso de drogas en tiempo real a través de los compuestos base y sus metabolitos.⁸⁻¹² El monitoreo de drogas en aguas residuales se ha implementado en plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) que dan servicio a áreas poblacionales bien definidas, lo que permite estimar el consumo per cápita de la población servida por el sistema de drenaje que alimenta la planta. Una aproximación similar puede utilizarse en espacios como escuelas, centros de readaptación social, recreación o tratamiento. Finalmente, el relativo bajo costo de esta metodología permite la medición frecuente, lo que favorece estimaciones de consumo mensual, semanal, diario e incluso horario.^{13,14} En este estudio piloto se explora la factibilidad de medir las concentraciones de anfetamina, metanfetamina, éxtasis (MDMA), marihuana, cocaína, heroína y sus metabolitos en aguas residuales de PTAR y sitios con poblaciones específicas.

Material y métodos

Selección de ciudades

El muestreo se realizó en ciudades de 13 estados de la República mexicana, seleccionadas a conveniencia considerando el tamaño poblacional, niveles conocidos de consumo de drogas y niveles de violencia (homicidios y secuestros). Las ciudades fueron Ciudad de México, Ecatepec, Ciudad Juárez, Chihuahua, Guadalajara, Cuernavaca, Culiacán, Torreón, Nuevo Laredo, Ciudad Obregón, Chilpancingo, Acapulco, Poza Rica, Veracruz, Tabasco, Tijuana, Mérida, Tapachula, Texcoco, Tlalnepantla. En las ciudades incluidas se seleccionaron las PTAR principales para la toma de muestras de agua residual (información en material suplementario).¹⁵

Selección de sitios con poblaciones específicas

Para determinar la factibilidad de evaluación de microambientes, en las ciudades seleccionadas se tomaron muestras de Centros de Readaptación Social (Cereso) (n=15) y unidades de tratamiento de adicciones (UTA) (n=42, 32 centros de integración juvenil y 10 centros de atención primaria en adicciones). Adicionalmente se seleccionaron 38 centros educativos (35 de nivel bachillerato y 3 de nivel licenciatura) (información en material suplementario).¹⁵ Este estudio no involucró la toma de muestras biológicas ni la obtención de datos a nivel individual. Los procedimientos de estudio fueron aprobados por los comités de ética, investigación y bioseguridad del Instituto Nacional de Salud Pública (proyecto 1384).

Método de recolección de muestras de agua residual

Las muestras de agua residual fueron recolectadas en influentes de PTAR y en efluentes de sitios con poblaciones específicas. Las muestras fueron obtenidas con muestreadores manuales durante los meses de noviembre y diciembre de 2015. Se recolectaron muestras compuestas mediante la técnica de muestreo tiempo-proporcional, con las que se obtuvo 250 mL de agua residual cada 15 minutos, hasta completar un litro en una hora. Al finalizar el muestreo se conjuntaron las 24 muestras tomadas cada hora para generar una muestra integrada del día. Las PTAR proporcionaron información sobre la tasa de flujo (L/día) y la población servida por la planta (número de personas).

En los sitios con poblaciones específicas, las muestras fueron obtenidas de los registros de distribución,

antes de su ingreso al drenaje general de la localidad. La toma de muestras se realizó durante el horario de atención, al inicio de la jornada laboral, cuatro horas después del inicio de actividades y al final de la jornada laboral; las muestras se integraron al final del día. En el caso de los Cereso, se obtuvo una cuarta muestra vespertina-nocturna. Las muestras se mantuvieron a 4 °C hasta su preparación; en todos los casos el tiempo transcurrido entre el muestreo y la preparación fue menor a 24 h. El muestreo de agua residual se realizó con el permiso y cooperación de las autoridades de los distintos sitios de muestreo. Para prevenir sesgos, los residentes en los centros fueron cegados al estudio.

Análisis de muestras

El análisis de las muestras de agua residual se realizó en el laboratorio de la Universidad Jaume I de Castellón, España, e incluyó una primera etapa de cribado de drogas. Posteriormente, se cuantificaron nueve metabolitos de drogas, THC-COOH (metabolito del tetrahidrocannabinol, principio activo de la marihuana); cocaína y benzoilecgonina (metabolitos de la cocaína), anfetamina; metanfetamina; 3,4-metilendioxi-metanfetamina-MDMA (metabolito de éxtasis); morfina, mono-acetilmorfina y heroína (metabolitos de heroína). El análisis consistió en dos etapas: la preparación de las muestras y el análisis cromatográfico; este último fue una variante optimizada y validada del desarrollado por Castiglioni y colaboradores¹⁶ y el propuesto en la guía europea SANCO para el análisis de residuos de plaguicidas.¹⁶⁻¹⁹ La preparación de cada muestra consistió en su dilución $\frac{1}{4}$, extracción en fase sólida con cartuchos Oasis HLB (acondicionados con 6 ml de metanol + 6 ml de agua Mili-Q + 200 μ L de estándar interno (10 μ g/L)), evaporación a 35°C en nitrógeno y su reconstitución en 1 mL de metanol al 10%. El análisis cromatográfico fue realizado en un cromatógrafo de líquidos de ultra alta resolución Waters Acquity UHPLC (Milford, MA, Estados Unidos) interconectado a un espectrómetro de masas de triple cuadrupolo (Xevo TQS, Waters Micromass, Manchester, Reino Unido) equipado con T-Wave y una interfaz de ionización por electrospray (ESI) con operación en modo de ion positivo. Las fases móviles usadas fueron A= agua: acetato de amonio 5 mM: ácido fórmico 0.01% y B=metanol. El volumen de muestra inyectado fue de 20 μ L. Los datos se procesaron en el programa MassLynx v 4.1. La concentración de cada compuesto se expresó en ng/L de muestra de agua residual.

Estimación del consumo de drogas en PTAR

La estimación del consumo de drogas se realizó mediante el cálculo en retroceso establecido por Zuccato.⁹ La estimación consistió en obtener la cantidad de residuo de droga por día (ng/día) multiplicando la concentración de la droga o su metabolito expresado en ng/L por la tasa de flujo de agua que ingresó a la PTAR el día del muestreo (L/día). La cantidad de residuo de cada droga se ajustó utilizando un factor de corrección.¹³ Para obtener el consumo de drogas expresado en mg/día/1000 habitantes, la cantidad ajustada se dividió entre el tamaño de la población entre 15 a 34 años de edad, atendida por la PTAR, suponiendo que no hubo pérdida relevante de agua residual en el sistema de alcantarillado durante el muestreo.

Análisis estadístico

La concentración de las drogas y sus metabolitos fue descrita utilizando mediana y rango intercuartílico (P25, P50, P75), concentración mínima y máxima. La estimación del consumo de anfetamina, metanfetamina, cocaína y marihuana se vinculó con la ubicación de las PTAR en cada estado de la República mexicana.

La presencia de metabolitos de drogas en centros educativos, Cereso y UTA fue descrita en porcentajes; además, se presentaron la mediana, rango intercuartílico (P25, P50, P75) y concentración mínima y máxima de cada droga por sitio de muestreo. El análisis de datos fue realizado con el programa estadístico STATA versión 13 (StataCorp LP) y los gráficos realizados con el programa R, versión 3.1.0.

Resultados

Se encontraron seis de nueve metabolitos de drogas en niveles cuantificables: THC-COOH, cocaína, benzoilecgonina, anfetamina, metanfetamina y morfina. Adicionalmente, el consumo de marihuana, cocaína, anfetamina y metanfetamina a nivel poblacional se estimó en agua residual de PTAR. En centros educativos, Cereso y UTA, sólo se cuantificaron los metabolitos de drogas sin estimar el consumo.

Drogas ilícitas a nivel poblacional (ciudades)

El cuadro I presenta la concentración mediana de drogas cuantificadas en influentes de PTAR, de acuerdo con su ubicación. Anfetamina fue cuantificada únicamente

Cuadro I
CONCENTRACIÓN DE DROGAS ILEGALES (NG/L) CUANTIFICADAS EN MUESTRAS COMPUESTAS DE 24 H DE AGUA RESIDUAL PROCEDENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO (NOVIEMBRE Y DICIEMBRE DE 2015) POR ESTADO, MÉXICO

Droga ilegal y/o metabolito	Concentración (ng/L)											
	Anfetamina		Metanfetamina		THC-COOH		Cocaína		Benzoilegonina		Morfina	
	n/N	p50 (p25,p75)	n/N	p50 (p25,p75)	n/N	p50 (p25,p75)	n/N	p50 (p25,p75)	n/N	p50 (p25,p75)	n/N	p50 (p25,p75)
Estado de México	0/1	NC	1/1	48.0 (48.0,48.0)	1/1	224.0 (224.0,224.0)	1/1	192.0 (192.0,192.0)	1/1	980.0 (980.0,980.0)	0/1	NC
Ciudad de México	0/6	NC	3/6	28.0 (20.0,52.0)	6/6	112.0 (96.0, 228.0)	6/6	118.0 (20.0,176.0)	6/6	552.0 (360.0,660.0)	0/6	NC
Chihuahua	0/2	NC	1/2	68.0 (68.0,68.0)	2/2	287.0 (138.0,436.0)	1/2	13.0 (13.0,13)	2/2	290.0 (28.0,552.0)	1/2	25.2 (25.2,25.2)
Jalisco	0/1	NC	0/1	108.0 (108.0,108.0)	0/1	NC	1/1	16.0 (16.0,16.0)	1/1	464.0 (464.0,464.0)	0/1	NC
Morelos	0/2	NC	1/2	36.0 (36.0,36.0)	1/2	112.0 (112.0,112.0)	2/2	174.0 (164.0,184.0)	2/2	398.0 (368.0,428.0)	1/2	132.0 (132.0,132.0)
Sinaloa	1/1	120.0 (120.0,120.0)	1/1	2308.0 (2308.0,2308.0)	1/1	176.0 (176.0,176.0)	1/1	628.0 (628.0,628.0)	1/1	1092.0 (1092.0,1092.0)	0/1	NC
Coahuila	0/1	NC	1/1	140.0 (140.0,140.0)	1/1	184.0 (184.0,184.0)	1/1	36.0 (36.0,36.0)	1/1	100.0 (100.0,100.0)	0/1	NC
Tamaulipas	1/1	152.0 (152.0,152.0)	1/1	388.0 (388.0,388.0)	1/1	136.0 (136.0,136.0)	1/1	412.0 (412.0,412.0)	1/1	1500.0 (1500.0,1500.0)	1/1	108.0 (108.0,108.0)
Sonora	0/4	NC	3/4	480.0 (340.0,1000.0)	3/4	180.0 (132.0,324.0)	3/4	36.0 (24.0,176.0)	3/4	236.0 (108.0,624.0)	0/4	NC
Guerrero	0/2	NC	1/2	24.0 (24.0,24.0)	1/2	80.0 (80.0,80.0)	2/2	36.0 (12.0,60.0)	2/2	142.0 (56.0,228.0)	0/2	NC
Veracruz	0/5	NC	0/5	NC	2/5	72.0 (68.0,76.0)	5/5	12.0 (8.0,12.0)	4/5	20.0 (14.0,32.0)	0/5	NC
Tlaxaco	0/3	NC	0/3	NC	1/3	64.0 (64.0,64.0)	3/3	28.0 (12.0,40.0)	3/3	48.0 (12.0,128.0)	0/3	NC
Quintana Roo	1/2	80.0 (80.0,80.0)	0/2	NC	2/2	246.0 (228.0,264.0)	2/2	210.0 (200.0,220.0)	2/2	1516.5 (1317.0,1716.0)	0/2	NC

n/N: número de centros/total de centros

NC: no cuantificable

THC-COOH, 11-Nor-9-carboxi-delta-9-tetrahidrocannabinol, metabolito secundario del tetrahidrocannabinol

en Tamaulipas (152.0 ng/L), Sinaloa (120.0 ng/L) y Quintana Roo (80.0 ng/L). La mayoría de las PTAR tuvieron niveles cuantificables de metanfetamina, con la concentración más alta en Sinaloa (2 308.0 ng/L). Los niveles más altos de THC-COOH se cuantificaron en Chihuahua (287.0 ng/L). Los niveles más altos de cocaína se encontraron en Sinaloa (628.0 ng/L). La

concentración más alta de benzoilecgonina se cuantificó en Tamaulipas (1 500.0 ng/L). Se encontró morfina en niveles cuantificables en Morelos (132.0 ng/L), Tamaulipas (108.0 ng/L) y Chihuahua (25.2 ng/L).

En la figura I se muestran los niveles de consumo estimados de anfetamina, metanfetamina, cocaína y marihuana, por ubicación de la PTAR. El consumo más

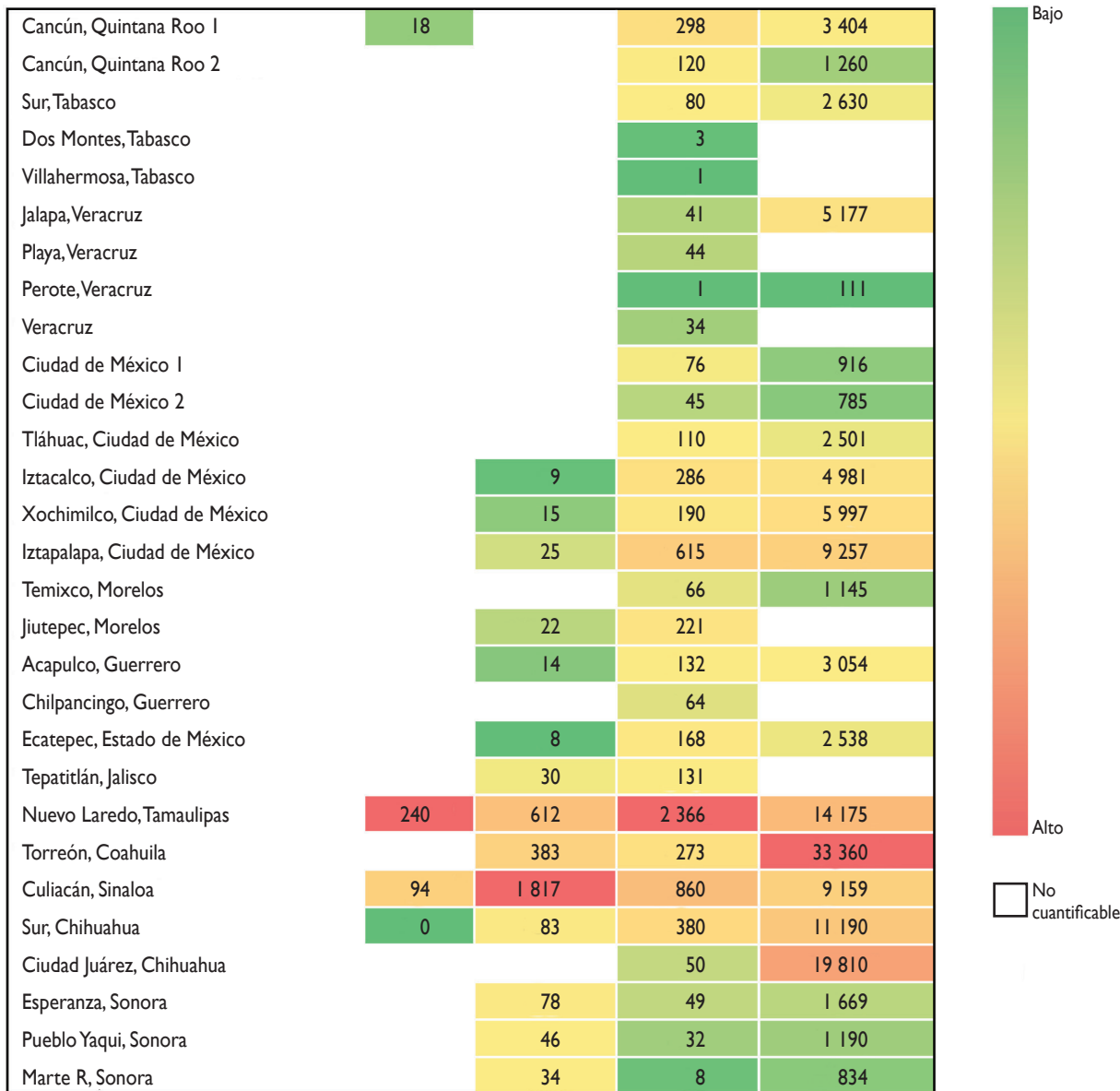


FIGURA I. NIVELES DE CONSUMO COMUNITARIO DE ANFETAMINA, METANFETAMINA, COCAÍNA Y MARIHUANA (MG/I 000 HAB/DÍA) ESTIMADOS A PARTIR DE LA CONCENTRACIÓN DE SU METABOLITO EN MUESTRAS COMPUESTAS DE 24 H DE AGUA RESIDUAL TOMADAS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO EN NOVIEMBRE Y DICIEMBRE DE 2015. MÉXICO

alto de anfetamina se encontró en Nuevo Laredo (240 mg/día/1 000 hab). La metanfetamina se cuantificó en 14 PTAR; la ubicada en Culiacán reportó el consumo más alto (1 817 mg/día/1 000 hab). El consumo de cocaína se estimó en 29 PTAR, y la ubicada en Nuevo Laredo (2 366 mg/día/1 000 hab) evidenció el consumo más alto. El consumo de marihuana se estimó en 22 PTAR, y el nivel más alto se encontró en Torreón (33 360 mg/día/1 000 hab).

Drogas ilícitas en sitios con poblaciones específicas

El cuadro II muestra el porcentaje de centros educativos, Cereso y UTA incluidos en el estudio. En dichos centros se detectaron ocho de nueve metabolitos de drogas en agua residual (anfetamina, metanfetamina, MDMA, THC-COOH, cocaína, benzoilecgonina, morfina y mono-acetilmorfina). La cocaína fue la droga ilícita más detectada, ya que se identificó en 93.3% de los Cereso, 92.9% de los UTA y 89.5% de los centros educativos; la benzoilecgonina se encontró en proporciones similares entre los centros. La anfetamina fue la menos detectada con 9.5% de los UTA, 6.7% de los Cereso y 5.3% de los centros educativos.

El cuadro III presenta las concentraciones de los metabolitos de drogas encontrados en los sitios con poblaciones específicas. La mediana de concentración del THC-COOH fue de 1 808.0 ng/L en los Cereso, 382.0 ng/L en UTA y 152.0 ng/L en centros educativos. La mediana de metanfetamina en Cereso fue 116.0 ng/L, en UTA 120.0 ng/L y en centros educativos 318.0 ng/L. La anfetamina se encontró en mayor concentración en UTA, con una mediana de 716.0 ng/L, en centros educativos 100 ng/L y en Cereso no fue cuantificable. Los Cereso tuvieron las concentraciones medianas de cocaína más elevadas, con 320.0 ng/L, seguidos por UTA y centros educativos con una mediana de 12.0 ng/L cada uno. Los niveles más altos de benzoilecgonina se cuantificaron en Cereso, con una mediana de 1 940.0 ng/L. Los niveles más altos de morfina fueron cuantificados en UTA, con una mediana de 920.0 ng/L; los centros educativos no presentaron niveles cuantificables.

Discusión

Este estudio confirma la factibilidad de evaluar el consumo de drogas en México a través de la medición de sus metabolitos en aguas residuales. Los metabolitos de drogas identificados y cuantificados en mayor propor-

Cuadro II
PRESENCIA DE DROGAS ILEGALES Y SUS METABOLITOS EN AGUAS RESIDUALES MUESTREADAS ENTRE NOVIEMBRE Y DICIEMBRE DE 2015 EN SITIOS CON POBLACIONES ESPECÍFICAS. MÉXICO

Droga	Compuesto cuantificado	Tipo de centro de muestreo	Presencia n/N (%)	Droga	Compuesto cuantificado	Tipo de centro de muestreo	Presencia n/N (%)
Anfetamina	Anfetamina	Educativo	2/38 (5.3)	Cocaína	Cocaína	Educativo	34/38 (89.5)
		Cereso	1/15 (6.7)			Cereso	14/15 (93.3)
		UTA	4/42 (9.5)			UTA	39/42 (92.9)
Metanfetamina	Metanfetamina	Educativo	14/38 (36.8)	Benzoilecgonina	Benzoilecgonina	Educativo	35/38 (92.1)
		Cereso	9/15 (60.0)			Cereso	15/15 (100.0)
		UTA	23/42 (54.8)			UTA	39/42 (92.9)
Éxtasis	3,4-metilendioxi-metanfetamina (MDMA)	Educativo	0/38 (0)	Morfina	Morfina	Educativo	2/38 (5.3)
		Cereso	0/15 (0)			Cereso	5/15 (33.3)
		UTA	1/42 (2.4)			UTA	13/42 (30.9)
Marihuana (cannabis)	(THC-COOH)	Educativo	31/38 (81.6)	Heroína	Mono-acetilmorfina	Educativo	2/38 (5.3)
		Cereso	14/15 (93.3)			Cereso	0/15 (0.0)
		UTA	26/42 (61.9)			UTA	1/42 (2.4)
		Educativo	0/38 (0.0)	Heroína	Heroína	Educativo	0/38 (0.0)
		Cereso	14/15 (93.3)			Cereso	0/15 (0.0)
		UTA	26/42 (61.9)			UTA	0/42 (0.0)

n/N: número de centros/total de centros

UTA: Unidad de Tratamiento de Adicciones

Cereso: Centro de Readaptación Social

THC-COOH, 11-Nor-9-carboxi-delta-9-tetrahidrocannabinol, metabolito secundario del tetrahidrocannabinol

Cuadro III
CONCENTRACIÓN DE DROGAS ILEGALES EN AGUA RESIDUAL MUESTREADA ENTRE NOVIEMBRE Y DICIEMBRE DE 2015 EN SITIOS CON POBLACIONES ESPECÍFICAS. MÉXICO

Sitio	n/N	Concentración (ng/L)		n/N	Concentración (ng/L)	
		Mín,Máx	p50 (p25,p75)		Mín,Máx	p50 (p25,p75)
Metabolito	THC-COOH			Cocaína		
Centros Educativos	22/38	28.0,4352.0	152.0 (124.0,528.0)	24/38	5.0,100.0	12.0 (8.7,7.0)
Cereso	14/15	136.0,16028.0	1808.0 (628.0,10236.0)	14/15	5.32,10304.0	320.0 (78.3,5639.1)
UTA	22/42	24.0,8544.0	382.0 (176.0,1240.0)	29/42	6.0,1338.4	12.1 (8.0,68.0)
Metabolito	Metanfetamina			Benzoilecgonina		
Centros Educativos	4/38	28.0,608.0	318.0 (76.0,560.0)	33/38	4.0,1784.0	16.0 (11.1,52.0)
Cereso	9/15	24.0,456.9	116.0 (47.5,332.0)	15/15	14.9,15953.2	1940.0 (96.0,9716.5)
UTA	15/42	44.0,11632.0	120.0 (64.2,308.0)	38/42	3.0,7667.7	30.1 (12.0,456.0)
Metabolito	Anfetamina			Morfina		
Centros Educativos	2/38	80.0,120.0	100.0 (80.0,120.0)	0/38	NC	NC
Cereso	0/15	NC	NC	5/15	21.1,1180.0	251.6 (36.0,580.0)
UTA	3/42	288.1,1620.0	716.0 (288.1,1620.0)	10/42	20.2,45076.0	920 (37.2,6178.4)

n/N: número de centros/total de centros

UTA: Unidad de Tratamiento de Adicciones

Cereso: Centro de Readaptación Social

NC: No cuantificable

THC-COOH, 11-Nor-9-carboxi-delta-9-tetrahidrocannabinol, metabolito secundario del tetrahidrocannabinol

ción en los influentes de PTAR fueron el THC-COOH (metabolito de marihuana), cocaína y benzoilecgonina (metabolitos de cocaína), metanfetamina y anfetamina. Esto revela que la población abastecida por estas PTAR presenta un consumo enfocado en marihuana y cocaína, acorde con el perfil de consumo reportado en la Encodat 2016-2017.¹ Los consumos más elevados de cocaína se encontraron en Nuevo Laredo, Culiacán y Torreón. El consumo de marihuana fue mayor en Ciudad de México y Sonora. La metanfetamina fue más consumida en ciudades del norte del país, mientras el consumo de anfetamina fue evidente en Nuevo Laredo, Culiacán y Cancún. No se cuantificó heroína en las muestras obtenidas, lo cual podría atribuirse a la degradación química del compuesto en la matriz de estudio que ha sido reportada anteriormente.^{16,19}

Los metabolitos detectados con mayor frecuencia en Cereso, UTA y centros educativos fueron de marihuana y cocaína. El THC-COOH se identificó en los Cereso (93.3%) y centros educativos (81.6%). La cocaína y la benzoilecgonina fueron identificadas en más de 90% de los centros educativos, Cereso y UTA. La proporción de Cereso con detección de THC-COOH confirma la alta

prevalencia de utilización de esta droga en población penitenciaria, lo cual ha sido reportado en estudios previos.²⁰ La identificación de marihuana y cocaína en gran parte de los centros educativos revela que estas dos drogas son consumidas por población adolescente, lo cual se aproxima a lo reportado por la Encodat 2016-2017 (5.3% de esta población usó marihuana y 1.1% cocaína)¹ y la Encuesta Nacional de Consumo de Drogas en Estudiantes (Encode-2014), en población urbana (11.6% de la población de bachillerato usó marihuana y 3.5% cocaína).²¹ Es factible estimar el consumo de drogas en escuelas con esta técnica no invasiva, como lo ha hecho Zucatto en escuelas de Milan, Turin y Verona, donde el THC-COOH fue el metabolito de droga encontrado en mayor proporción.²² En Cereso y UTA se cuantificó morfina, metabolito no específico de la heroína. Sin embargo, la morfina también puede proceder del consumo de morfina terapéutica y de codeína.¹³ La identificación de heroína después de su consumo es complicada, debido a que la tasa de excreción urinaria es muy baja y es metabolizada principalmente como morfina y acetilmorfina.^{13,23} Además, su estabilidad es baja y su detección analítica es difícil debido a su estructura acetilada,^{23,24} por lo que

estudios interesados en la cuantificación de heroína requerirán muestreos cercanos al punto de excreción, análisis inmediato y técnicas analíticas más refinadas.

La cuantificación de drogas en sitios con poblaciones específicas evidenciaron que el THC-COOH y la benzoilecgonina son los metabolitos eliminados en mayor cantidad. En los efluentes de Cereso, el rango de THC-COOH excretado osciló entre 628.0 ng/L y 10 236.0 ng/L, y el de benzoilecgonina entre 96.0 y 9 716.5 ng/L. Estos datos evidencian la factibilidad de usar el método de aguas residuales para cuantificar el consumo de drogas en población penitenciaria, siguiendo la misma línea de implementación de Postigo y colaboradores²⁵ y Brewer y colaboradores.²⁶ En centros educativos, el rango de THC-COOH eliminado osciló entre 124.0 ng/L y 528.0 ng/L y entre 11.0 ng/L y 52.0 ng/L para benzoilecgonina. Aunque esta información no representa una estimación del consumo, sí evidencia su utilidad como herramienta de monitoreo al conocer la cantidad de población que vierte sus desechos. El hallazgo de concentraciones elevadas de los metabolitos de cocaína y marihuana hace factible el estudio de perfiles de uso de drogas a través de aguas residuales y con ello dar seguimiento a los cambios en el tipo de drogas utilizadas, lo cual ayudará a informar sobre los tratamientos para reducir el consumo de forma oportuna y precisa.

Existen limitaciones en la estimación del consumo de drogas mediante aguas residuales. Se tiene incertidumbre en el muestreo de agua residual y estimación del tamaño de población servida por PTAR. Sin embargo, es un método de relativo bajo costo que permite la comparación entre sitios muestreados con las mismas fuentes de incertidumbre. Este estudio no refleja un estado conclusivo del consumo de drogas en los lugares muestreados, ya que sólo consideró el análisis de algunas PTAR en ciertas ciudades. Debido a que sólo 43.4% de descargas de aguas residuales emitidas en los centros urbanos de México llegan a PTAR, esta estimación no es una representación del contexto nacional, sino una aproximación al consumo en zonas urbanas y metropolitanas. Aun con estas limitaciones, el método tiene varias fortalezas, ya que hace posible la detección y cuantificación de drogas, lo que permite estimar el porcentaje de consumo y su intensidad, asumiendo que la población de origen es conocida. La facilidad para la toma de muestras, el anonimato que proporciona y la posibilidad de muestrear en lapsos de tiempo cortos hacen de la medición de drogas en aguas residuales una técnica útil para monitorear los cambios temporales en el consumo y evaluar el impacto de intervenciones dirigidas a modificar el consumo drogas en poblaciones cautivas o con poca movilidad.

Conclusiones

Este estudio representa el primer acercamiento a la cuantificación de drogas en aguas residuales, así como la evaluación de su consumo desde la epidemiología de aguas residuales, en diferentes ciudades de México. Esta aproximación permitió identificar ocho de nueve metabolitos de drogas. Adicionalmente, la medición de drogas en diferentes estados permitió identificar a las ciudades de Nuevo Laredo, Culiacán y Torreón como urbes de alto consumo. La medición de drogas en aguas residuales es factible al poder ser utilizada para establecer un sistema de vigilancia continuo del consumo de drogas.

Agradecimientos

Este estudio fue financiado por la Comisión Nacional Contra las Adicciones-Conadic (Centro Nacional para la Prevención y el Control de las Adicciones-Cenadic) en colaboración con el Instituto Nacional de Salud Pública (Cenadic/INSP/001/2015).

Declaración de conflicto de intereses. Los autores declararon no tener conflicto de intereses.

Referencias

1. Instituto Nacional de Psiquiatría Ramón de la Fuente Muñiz, Instituto Nacional de Salud Pública, Comisión Nacional Contra las Adicciones, Secretaría de Salud. Encuesta Nacional de Consumo de Drogas, Alcohol y Tabaco 2016-2017: Reporte de Drogas. Ciudad de México, México: INPRFM, 2017 [citado 5 de febrero 2018]. Disponible en: <https://www.gob.mx/salud/7Cconadic/acciones-y-programas/encuesta-nacional-de-consumo-de-drogas-alcohol-y-tabaco-encodat-2016-2017-136758>
2. Volkow ND, Poznyak V, Saxena S, Gerra G. UNODC-WHO Informal International Scientific Network. Drug use disorders: impact of a public health rather than a criminal justice approach. *World Psychiatry*. 2017;16(2):213-214. <https://doi.org/10.1002/wps.20428>
3. Harrison L, Hughes A, eds. The Validity of Self-Reported Drug Use: Improving Accuracy of Survey Estimates Department of Health and Human Services. Rockville (MD): National Institute of Drug Abuse, 1997: 17-36 [citado marzo 2018]. Disponible en: https://archives.drugabuse.gov/sites/default/files/monograph167_0.pdf
4. European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction. Handbook for surveys on drug use among the general population. Final report. EMCDDA project CT.99.EP.08 B. Lisbon: EMCDDA, 2002 [citado febrero 2018]. Disponible en: http://www.emcdda.europa.eu/system/files/publications/244/Handbook_for_surveys_on_drug_use_among_the_general_population_-_2002_106510.pdf
5. Kolenikov S, Pitblado J. Analysis of Complex Health Survey Data. In: Johnson TP, ed. Handbook of health survey methods. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015. <https://doi.org/10.1002/9781118594629.ch29>
6. Mounteney J, Griffiths P, Sedefov R, Noor A, Vicente J, Simon R. The drug situation in Europe: an overview of data available on illicit drugs and new psychoactive substances from European monitoring in 2015. *Addiction*. 2016;111(1):34-48. <https://doi.org/10.1111/add.13056>

7. Tourangeau R, Yan T. Sensitive questions in surveys. *Psychol Bull.* 2007;133(5):859-83. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.133.5.859>
8. Daughton CG, Jones-Lepp TL. Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Environment. Scientific and Regulatory Issues. Symposium Series 791. Washington, DC: American Chemical Society, 2001:348-64. <https://doi.org/10.1021/bk-2001-0791>
9. Zuccato E, Chiabrando C, Castiglioni S, Bagnati R, Fanelli R. Estimating community drug abuse by wastewater analysis. *Environ Health Perspect.* 2008;116(8):1027-32. <https://doi.org/10.1289/ehp.11022>
10. Thomas KV, Bijlsma L, Castiglioni S, Covaci A, Emke E, Grabic R, et al. Comparing illicit drug use in 19 European cities through sewage analysis. *Sci Total Environ.* 2012;432:432-439. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.069>
11. Yargeau V, Taylor B, Li H, Rodayan A, Metcalfe CD. Analysis of drugs of abuse in wastewater from two Canadian cities. *Sci Total Environ.* 2014;487:722-30. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.094>
12. Banta-Green CJ, Brewer AJ, Ort C, Helsel DR, Williams JR, Field JA. Using wastewater-based epidemiology to estimate drug consumption. Statistical analyses and data presentation. *Sci Total Environ.* 2016;568:856-63. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.052>
13. European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction. Assessing illicit drugs in wastewater: advances in wastewater-based drug epidemiology. *Insights 22.* Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016:17-40 [citado abril 2018]. Disponible en: http://www.emcdda.europa.eu/system/files/publications/2273/TDXD16022ENC_4.pdf
14. Ort C, van Nuijs AL, Berset JD, Bijlsma L, Castiglioni S, Covaci A, et al. Spatial differences and temporal changes in illicit drug use in Europe quantified by wastewater in Europe quantified by wastewater analysis. *Addiction.* 2014;109(8):1338-52. <https://doi.org/10.1111/add.12570>
15. Cruz C. Anexo_electronico_DI_AR. Harvard Dataverse, 2018. <https://doi.org/10.7910/DVN/BIJUDH>
16. Castiglioni S, Zuccato E, Crisci E, Chiabrando C, Fanelli R, Bagnati R. Identification and measurement of illicit drugs and their metabolites in urban wastewater by liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Anal Chem.* 2006;78:8421-9. <https://doi.org/10.1021/ac061095b>
17. European Commission Health and Consumer Protection Directorate-General. Guidance document on analytical quality control and validation procedures for pesticide residues analysis in food and feed (SANCO/12571/2013). Bruselas, Bélgica: Comisión Europea, 2013 [citado 10 de abril 2018]. Disponible en: http://www.eurl-pesticides.eu/library/docs/allcr/AqcGuidance_Sanco_2013_12571.pdf
18. Postigo C, Lopez de Alda MJ, Barcelo D. Fully automated determination in the low nanogram per liter level of different classes of drugs of abuse in sewage water by on-line solid-phase extraction-liquid chromatography-electrospray-tandem mass spectrometry. *Anal Chem.* 2008;80:3123-34. <https://doi.org/10.1021/ac702060j>
19. van Nuijs AL, Castiglioni S, Tarcornicu I, Postigo C, Lopez de Alda M, Neels H, et al. Illicit drug consumption estimations derived from wastewater analysis: a critical review. *Sci Total Environ.* 2011;409(19):3564-77. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.05.030>
20. Morales ChS, Mejia CD, Gordillo MT. Mujeres y hombres en reclusión con consumo de sustancias psicoactivas. Guía para el Tratamiento e Integración Social en Materia de Adicciones. Ciudad de México: Instituto para la Atención y Prevención de las Adicciones en la Ciudad de México, 2013:20-30 [citado mayo 2018]. Disponible en: http://201.161.17.101/media/Documentos/07.01_Publicaciones%20APA/07.01.02_LI-BROS/2013_07%20Gu%C3%ADa%20para%20el%20tratamiento%20e%20integraci%C3%B3n%20social%20en%20materia%20de%20adicciones/HyMen%20reclusionL.pdf
21. Instituto Nacional de Psiquiatría Ramón de la Fuente Muñiz, Comisión Nacional Contra las Adicciones, Secretaría de Salud. Encuesta Nacional de Consumo de Drogas en Estudiantes 2014: Reporte de Drogas. México DF, México: INPRFM, 2015 [citado 15 de enero 2018] Disponible en: http://www.conadic.salud.gob.mx/pdfs/investigacion/ENCODE_DROGAS_2014.pdf
22. Zuccato E, Gracia-Lor E, Rousis NI, Parabiaghi A, Senta I, Riva F, et al. Illicit drug consumption in school populations measured by wastewater analysis. *Drug Alcohol Depend.* 2017;178:285-290. <https://doi.org/10.1016/j.drugalcdep.2017.05.030>
23. D'Ascenzo, G, Di CA, Gentili A, Mancini R, Mastropasqua R, Nazzari M, et al. Fate of natural estrogen conjugates in municipal sewage transport and treatment facilities. *Sci Total Environ.* 2003;302:199-209. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00342-X](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00342-X)
24. Greenwood RG, Vrana B, eds. *Comprehensive Analytical Chemistry.* Amsterdam, Holland: Elsevier, 2007:171-97. [https://doi.org/10.1016/S0166-526X\(06\)48008-9](https://doi.org/10.1016/S0166-526X(06)48008-9)
25. Postigo C, López de Alda M, Barceló D. Evaluation of drugs of abuse use and trends in a prison through wastewater analysis. *Environment Int.* 2011;37:49-55. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2010.06.012>
26. Brewer AJ, Banta-Green CJ, Ort C, Robel AE, Field J. Wastewater testing compared with random urinalyses for the surveillance of illicit drug use in prisons. *Drug Alcohol Rev.* 2016;35(2):133-7. <https://doi.org/10.1111/dar.12185>