



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN ECONOMÍA

FACULTAD DE ECONOMÍA ♦ DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS AMBIENTALES DEL CICLO  
DE VIDA DEL AGUA EMBOTELLADA EN CIUDAD DE MÉXICO

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**Maestra en Economía**

PRESENTA:

**Laura Estela del Moral Palacio**

TUTOR PRINCIPAL:

Dr. José Ángel de la Vega Navarro  
Facultad de Economía, UNAM

COMITÉ TUTOR:

Dr. Luis Gómez Oliver  
Facultad de Economía, UNAM

Dr. Alonso Aguilar Ibarra  
Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM

Dr. Daniel Alfredo Revollo Fernández  
Facultad de Economía, UNAM

Dr. Carlos Andrés López Morales  
El Colegio de México

Ciudad Universitaria, Cd. Mx.

Diciembre de 2022



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS AMBIENTALES DEL CICLO DE VIDA DEL AGUA EMBOTELLADA EN CIUDAD DE MÉXICO

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	3
ÍNDICE DE TABLAS.....	3
RESUMEN.....	5
INTRODUCCIÓN.....	7
HIPÓTESIS.....	15
OBJETIVOS.....	15
ALCANCES.....	16
<b>I. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>18</b>
A. MARCO HISTÓRICO: CAUSAS DEL CONSUMO DE AGUA EMBOTELLADA EN CIUDAD DE MÉXICO.....	18
B. PROBLEMAS AMBIENTALES RELACIONADOS CON EL AGUA EMBOTELLADA.....	24
1. <i>Agotamiento de recursos no renovables</i> .....	24
a) Hidrocarburos.....	24
b) Agua.....	26
2. <i>Contaminación ambiental</i> .....	30
a) Contaminación del aire.....	30
b) Contaminación del agua.....	33
c) Contaminación del suelo.....	34
d) Residuos sólidos.....	34
C. ECONOMÍA.....	38
<b>II. METODOLOGÍA.....</b>	<b>47</b>
A. IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL DAÑO AMBIENTAL.....	48
1. <i>Búsqueda de información de estudios de Análisis de Ciclo de Vida</i> .....	51
2. <i>Identificación de las Categorías de Impacto relevantes</i> .....	58
3. <i>Definición de unidad funcional y cálculos de impactos ambientales</i> .....	59
B. CÁLCULOS AUXILIARES (BALANCES DE MATERIA).....	60
1. <i>Petróleo</i> .....	61
2. <i>Agua</i> .....	61
3. <i>Residuos sólidos</i> .....	64
4. <i>Distribución de impactos entre empaque y contenido</i> .....	65
5. <i>Contaminación del aire</i> .....	70
C. CÁLCULO DEL COSTO AMBIENTAL UNITARIO.....	71
1. <i>Búsqueda de Información</i> .....	71
2. <i>Actualización de costos a valores constantes</i> .....	76
D. CÁLCULO DEL COSTO AMBIENTAL POR UNIDAD FUNCIONAL PARA CADA CATEGORÍA DE IMPACTO.....	81
1. <i>Agotamiento de petróleo</i> .....	81
2. <i>Agotamiento del agua</i> .....	83
3. <i>Costo del daño por generación de residuos</i> .....	85
4. <i>Costo ambiental de la contaminación del aire</i> .....	88
5. <i>Costo de la contaminación del agua</i> .....	89
6. <i>Costo ambiental de la contaminación del suelo</i> .....	89
<b>III. RESULTADOS.....</b>	<b>91</b>

A.	COSTO AMBIENTAL TOTAL PARA LA UNIDAD FUNCIONAL.....	91
B.	COMPARACIÓN DEL COSTO AMBIENTAL VS. PRECIO PROMEDIO DE VENTA .....	92
C.	DISTRIBUCIÓN DEL COSTO AMBIENTAL ENTRE EMPAQUE (PET) Y CONTENIDO (AGUA) .....	93
D.	COSTO AMBIENTAL TOTAL DE LA INDUSTRIA DE AGUA EMBOTELLADA EN CIUDAD DE MÉXICO .....	95
<b>IV.</b>	<b>DISCUSIÓN.....</b>	<b>97</b>
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>111</b>
<b>VI.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>116</b>
<b>VII.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>130</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

---

ILUSTRACIÓN 1	PROCESOS PARA LA DE PRODUCCIÓN DE PET .....	25
ILUSTRACIÓN 2	COMPONENTES DEL VALOR ECONÓMICO TOTAL .....	41
ILUSTRACIÓN 3	CONTABILIDAD DE COSTOS AMBIENTALES .....	42
ILUSTRACIÓN 4	MÉTODOS Y TÉCNICAS DE VALORACIÓN MONETARIA .....	44
ILUSTRACIÓN 5	ESQUEMA METODOLÓGICO .....	47
ILUSTRACIÓN 6	CICLO DE VIDA DEL AGUA EMBOTELLADA.....	51
ILUSTRACIÓN 7	PROCEDENCIA DEL AGUA DE LAS EMBOTELLADORAS DE AGUA DE CIUDAD DE MÉXICO .....	62
ILUSTRACIÓN 8	VARIACIÓN DE LA PROPORCIÓN DE AGUA DE PROCESO Y AGUA BEBIBLE.....	63
ILUSTRACIÓN 9	BALANCE DE AGUA DE 1 BOTELLA, POR PROCEDENCIA Y DESTINO PARA CIUDAD DE MÉXICO .....	64
ILUSTRACIÓN 10	PRECIO PROMEDIO DE EXPORTACIÓN DEL PETRÓLEO VS. COSTO DEL AGOTAMIENTO DEL PETRÓLEO .....	82
ILUSTRACIÓN 11	COSTOS AMBIENTALES ANUALES DEL INEGI POR BOTELLA .....	134
ILUSTRACIÓN 12	CÁLCULO DEL COSTO AMBIENTAL DE CADA BOTELLA DE AGUA, POR CADA AUTOR.....	135

## ÍNDICE DE TABLAS

---

TABLA 1	RESUMEN DE CAUSAS Y EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA .....	31
TABLA 2	EFECTOS Y ESCALA DE LOS PRINCIPALES GASES DE EFECTO INVERNADERO .....	31
TABLA 3	REACTIVIDAD Y EFECTIVIDAD DE ALGUNOS GASES RELATIVA AL CO <sub>2</sub> .....	32
TABLA 4	RESULTADOS DE ACV DETTORE (2009) .....	52
TABLA 5	RESULTADOS ACV DE HOROWITZ ET AL (2018) .....	53
TABLA 6	RESULTADOS DE ACV DE NESSI ET AL (2012) .....	53
TABLA 7	RESULTADOS DE ACV DE ZOLLINGER ET AL (2017) .....	53
TABLA 8	RESULTADOS DE ACV DE GARFÍ ET AL (2016) .....	54
TABLA 9	RESULTADOS DE ACV DE STYPKA ET AL (2014).....	54
TABLA 10	RESULTADOS DE ACV DE GARCÍA-SUAREZ ET AL (2019).....	54
TABLA 11	RESULTADOS DE ACV DE FRANKLIN (2009) .....	55
TABLA 12	RESULTADOS DE CATEGORÍAS DE IMPACTO OBTENIDAS POR ACV, POR BOTELLA .....	60
TABLA 13	CONSUMO ENERGÉTICO DE PRODUCCIÓN DE AGUA EMBOTELLADA .....	61
TABLA 14	VOLUMEN DE AGUA SUMINISTRADA A LA ZONA METROPOLITANA DE CIUDAD DE MÉXICO .....	62
TABLA 15	DISTRIBUCIÓN DEL USO DE AGUA SUPERFICIAL Y AGUA SUBTERRÁNEA DE LA INDUSTRIA EMBOTELLADORA EN CIUDAD DE MÉXICO .....	62
TABLA 16	BALANCE DE AGUA SEGÚN SU ORIGEN Y DESTINO, PARA CIUDAD DE MÉXICO, PARA 1BOTELLA .....	63
TABLA 17	DIFERENTES VOLÚMENES Y PROPORCIONES DE AGUA DE PROCESO, BEBIBLE, SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA UTILIZADOS, 1 BOTELLA.....	64
TABLA 18	DESTINO FINAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS TOTALES PROMEDIO Y RESIDUOS DE PET, EN G/ BOTELLA.....	65

TABLA 19 DESTINO FINAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS TOTALES MÁXIMO, MÍNIMO Y PROMEDIO, EN G/BOTELLA.....	65
TABLA 20 CONTRIBUCIÓN DEL ENVASE O CONTENIDO A LAS CATEGORÍAS DE IMPACTO AMBIENTAL .....	66
TABLA 21 CONTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE LAS ETAPAS DE CICLO DE VIDA A LAS CATEGORÍAS DE IMPACTO AMBIENTAL .....	66
TABLA 22 ESTIMACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES DE LAS DIFERENTES ETAPAS DEL CICLO DE VIDA PARA EL ENVASE DE PET Y EL AGUA BEBIBLE (SEGÚN INFORMACIÓN DE DETTORE, 2009) .....	68
TABLA 23 CONTRIBUCIÓN AL POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL DE CADA ETAPA DEL CICLO DE VIDA.....	70
TABLA 24 CONTRIBUCIÓN DE FUENTES FIJAS Y FUENTES MÓVILES DE POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (SEGÚN INFORMACIÓN DE DETTORE, 2009).....	71
TABLA 25 COSTO DEL AGOTAMIENTO DE RECURSOS NATURALES Y DE LA CONTAMINACIÓN PARA MÉXICO EN EL PERÍODO 2003-2018, EN MIMPESOS (PESOS CORRIENTES) .....	74
TABLA 26 MAGNITUD DEL AGOTAMIENTO DE RECURSOS NATURALES Y DE LA CONTAMINACIÓN PARA MÉXICO, 2003-2018 .....	74
TABLA 27 COSTO ECONÓMICO TOTAL DE SISTEMA CUTZAMALA PARA 2015 .....	75
TABLA 28 COSTO AMBIENTAL UNITARIO DEL AGOTAMIENTO Y DE LA CONTAMINACIÓN PARA MÉXICO, VALORES DE 2013.....	79
TABLA 29 COSTOS ECONÓMICO TOTAL ACTUALIZADOS DEL SISTEMA CUTZAMALA .....	79
TABLA 30 COSTO DEL AGOTAMIENTO DE PETRÓLEO POR BOTELLA, INFORMACIÓN INEGI .....	81
TABLA 31 COSTO DEL AGOTAMIENTO DE PETRÓLEO POR BOTELLA, VALORES DE VÖGTLANDER ET AL (2010) .....	82
TABLA 32 COSTO AMBIENTAL DEL AGUA SUPERFICIAL POR BOTELLA.....	85
TABLA 33 COSTO AMBIENTAL DEL AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA POR BOTELLA .....	85
TABLA 34 COSTOS DE REMEDIACIÓN POR LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS TOTALES DISPERSOS EN AMBIENTE .....	86
TABLA 35 COSTOS DE GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	87
TABLA 36 COSTO AMBIENTAL TOTAL POR RESIDUOS SÓLIDOS COLECTADOS Y DISPERSOS .....	87
TABLA 37 COSTO TOTAL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA, POR BOTELLA. ....	89
TABLA 38 COSTO DE LA CONTAMINACIÓN DE AGUA DE PROCESO, POR BOTELLA .....	89
TABLA 39 RESUMEN DE COSTOS AMBIENTALES <b>PROMEDIO</b> , POR BOTELLA.....	91
TABLA 40 COSTOS AMBIENTALES PROMEDIO DEL <b>PET</b> POR CATEGORÍA DE IMPACTO, POR BOTELLA.....	93
TABLA 41 COSTOS AMBIENTALES DEL <b>AGUA BEBIBLE</b> POR CATEGORÍA DE IMPACTO, POR BOTELLA.....	94
TABLA 42 GENERACIÓN DE RSU EN CIUDAD DE MÉXICO, 2008-2018 .....	96
TABLA 43 FACTORES DE CONVERSIÓN: PIB A PRECIO CORRIENTE Y CONSTANTE DE 2013, INPC, PPC .....	132
TABLA 44 COSTO DEL AGOTAMIENTO DEL PETRÓLEO PARA MÉXICO ACTUALIZADO A VALORES DE 2013, 2003-2018, EN MIMPESOS .....	132
TABLA 45 COSTO DEL AGOTAMIENTO DE RECURSOS Y CONTAMINACIÓN, 2003-2018, VALORES DE 2013 .....	133
TABLA 46 COSTOS AMBIENTALES POR CATEGORÍA DE IMPACTO, 2003-2018, (PESOS/BOTELLA) .....	134
TABLA 47 RESUMEN DE COSTOS AMBIENTALES POR CADA BOTELLA DE AGUA, SEGÚN INFORMACIÓN DE DETTORE (2009) .....	135
TABLA 48 COSTOS AMBIENTALES PROMEDIO DEL <b>PET</b> POR CATEGORÍA DE IMPACTO, CON INFORMACIÓN DE DETTORE (2009). 136	
TABLA 49 COSTOS AMBIENTALES DEL <b>AGUA BEBIBLE</b> POR CATEGORÍA DE IMPACTO, CON INFORMACIÓN DE DETTORE (2009)...	136

## RESUMEN

---

Desde hace pocas décadas, el agua embotellada se ha convertido en un producto que se puede encontrar en todo el mundo y un negocio global que probablemente llegue a los \$307 mil millones de dólares en 2024 (Greene, 2018). En México, el consumo ha aumentado de forma tal que para 2010 ya ocupaba el primer lugar en consumo per cápita, llegando a 243 L/persona al año (Montero-Contreras, 2015); en 2018, el primer lugar en consumo mundial per cápita lo ocuparon México y Tailandia con un promedio de 274 L/persona, seguido de Italia con un consumo de 190 L/persona anuales (Statista.com, consultado el 4/03/2022). En Ciudad de México, el consumo per cápita es aún mayor por múltiples razones, como el daño a la infraestructura hidráulica por el temblor del 85, la epidemia de cólera de los 1990, la crisis financiera de las dos últimas décadas del siglo XX, el deficiente suministro de agua potable y las muy bien logradas estrategias de las compañías embotelladoras para vender su producto.

La problemática ambiental del agua embotellada gira en torno a la creciente producción; el origen no renovable de las materias primas usadas para fabricar la botella y los energéticos para el transporte; el agotamiento de acuíferos y en el caso de Ciudad de México, los costos y consecuencias derivadas de la importación de agua de cuencas cercanas; la contaminación de aire, tierra y agua que se originan en todas las etapas del ciclo de vida del agua embotellada, la acumulación y ubicuidad de los residuos de macro y micro-plásticos en el ambiente y, finalmente, el desconocimiento de los efectos toxicológicos reales de los plásticos y sus residuos hacia seres vivos y ecosistema.

En este trabajo se hace un estudio de caso para Ciudad de México, en el que se estima el costo ambiental de la producción y consumo de cada botella de agua envasada en PET, tomando en consideración todas las etapas involucradas en la industria del agua embotellada, como extracción y procesamiento de materias primas vírgenes, manufactura, transporte y distribución, uso y disposición final de residuos. Se hace uso de información publicada tanto de Análisis de Ciclo de Vida, como de Valoración Económica y estudios de contabilidad ambiental.

Como resultado se obtiene un costo ambiental unitario de \$2.68 pesos por cada litro de agua embotellada, que corresponde a un 35% del precio promedio de venta de 2013 de ese producto. Este valor representa el costo que las empresas tendrían que internalizar para compensar los daños al ambiente causados por cada botella. Del costo ambiental resultante, más del 58% se debe a contaminación del aire producido por fuentes fijas y móviles y el 40% por agotamiento del petróleo utilizado para la fabricación de materias primas y combustible.

Por otra parte, se obtiene la contribución proporcional del empaque de PET (46%) y al agua envasada (54%) al costo ambiental y se determina la contribución de las categorías de impacto a cada uno. En este caso, el costo ambiental más alto se debe a la contaminación ambiental proveniente de fuentes móviles, requerido para el transporte mismo del agua

bebible (46.6%), seguido por la contribución del PET al agotamiento de petróleo (33.6%). Esto es importante porque se evidencia que para resolver el problema ambiental relativo al agua embotellada no es suficiente únicamente reciclar o cambiar el material del envase; para hacer frente a la mayoría de los daños, que son los provocados por el transporte, es necesario *disminuir el consumo de agua embotellada*.

Adicionalmente, la desagregación de impactos ambientales por envase-producto es útil para proponer impuestos ambientales diferenciados, para definir responsabilidades específicas para cada generador y de acuerdo al tipo de impacto; y dimensionar y jerarquizar la importancia de cada impacto ambiental.

Finalmente, se incluye una estimación del valor del costo ambiental total de la industria del agua embotellada en Ciudad de México, que se estima son por lo menos \$9,349 millones de pesos (de 2013), más de cuatro veces que el presupuesto asignado para el manejo de los residuos sólidos de Ciudad de México.

Con los resultados obtenidos se puede dimensionar la problemática ambiental causada tanto por el consumo individual de agua embotellada como por la industria productora en su conjunto, y puede ser de utilidad para una propuesta de políticas públicas encaminadas a la resolución integral de la problemática aquí expuesta.

**Palabras clave:** agua embotellada, costo ambiental, Ciudad de México.

# INTRODUCCIÓN

---

*“Drinkers of bottled water are the new smokers”*  
*[Los bebedores de agua embotellada son los nuevos fumadores]*  
*Hawkins et al, 2015*

Todas las actividades económicas requieren recursos como energía, materiales y tierra, e invariablemente generan residuos que quedan en el ambiente como desechos o emisiones contaminantes (UNEP, 2010). Actualmente existe aceptación general de que el incremento de la pobreza, el cambio climático, el sobreuso de recursos, la pérdida de biodiversidad, la degradación del ambiente, son efecto directo del desarrollo económico.

Hasta hace poco tiempo, las intervenciones humanas en los sistemas naturales eran a pequeña escala, por lo que su impacto era limitado; las intervenciones actuales son más drásticas en escala e intensidad, y por lo tanto, más amenazantes para los ecosistemas locales y globales. Efectivamente, hasta la década de 1980 la producción industrial había crecido 50 veces desde los inicios de la industrialización, de las cuales 4/5 se dieron a partir de 1950 (UN, 1987). Según Brown (2001) la economía había crecido siete veces, al pasar de \$6 trillones en 1950 a \$43 trillones en 2000.

Esto representa un enorme crecimiento en términos de producto interno bruto pero a costa de un consumo peligrosamente rápido de recursos naturales, tanto renovables como no renovables, además de una alta tasa de generación de residuos y contaminantes (UN, 1987). Mientras más grande se vuelve la economía respecto al ecosistema, mayor es la presión que ejerce a los límites naturales de la tierra y más destructivas sus consecuencias (Brown, 2001), como los impactos en ecosistemas, extinción de especies, contaminación de aire, agua y suelos, degradación de suelos y alteración de los ciclos ecológicos; consecuencias visibles que indican una incompatibilidad entre el sistema económico actual y el ecosistema.

Este hilo conduce directamente a un ícono global que ha reconfigurado la realidad social de la época contemporánea: el agua embotellada.

El agua embotellada ya se vendía a pequeña escala desde el s. XIX, pero el crecimiento de las ventas se dieron a partir de la introducción del polietilentereftalato (PET) como medio de envase, empezando así, la cultura de lo no-retornable. El éxito de este material se debe a sus cualidades de ligereza, resistencia, durabilidad, capacidad de aislamiento del oxígeno, y su (artificialmente) bajo costo.

El mercado de agua embotellada es uno de los de mayor crecimiento en el mundo y se encuentra tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo. Se reparte entre Norteamérica (principalmente EUA y México) con casi el 30% del mercado global, Asia con poco menos del 29% y Europa con el 28% (Montero-Contreras, 2015).

Aun cuando el consumo mundial promedio per cápita en 2016 se encuentra en el rango de 50 – 62 L al año (Dunmade, 2017; Statista.com, consultado el 20/7/19), en nuestro país el

consumo anual per cápita de agua embotellada llegó a los 243.6 litros por persona en 2010, equivalente al 12.9% del consumo mundial (Rodwan, 2011); para 2016 ya eran más de 254 litros por persona (Rodwan, 2017). En 2020 nuestro país seguía siendo el mayor consumidor per cápita (282 L/persona), seguido por Italia (222 L/persona), Tailandia (215 L/persona) y Estados Unidos (171 L/persona) (Rodwan, 2021). Y en Ciudad de México el consumo fue aún mayor, llegando a 391 L/persona (Montero-Contreras, 2015), y en alcaldías con grandes problemas de calidad de agua como Iztapalapa, el consumo per cápita llega a 575 L al año (Montero-Contreras, 2016).

Se estima que en 2020 el mercado global superó los 409 mil millones de litros, con China en primer lugar con 105 mil millones de litros consumidos, seguido por Estados Unidos con 56 mil millones de litros y México en tercer lugar superó los 37 mil millones de litros consumidos (Rodwan, 2021).

Greene (2014) reporta que las ventas en 2011 en el mercado mexicano de agua embotellada fueron \$9 billones<sup>1</sup> de dólares (para un consumo de 28.5 billones de litros, según Rodwan, 2021) y esperaba que llegara a \$15 billones en 2015 (para un consumo de 30.6 billones de litros, según Rodwan, 2021); Montero-Contreras (2016) reporta que se estima el gasto anual en consumo de agua embotellada para Ciudad de México (antes Distrito Federal) en 4.683 millones de pesos. En cuanto al mercado mundial, se espera que alcance los \$350 billones de dólares en ventas en 2021 (Greene, 2021). De hecho, bancos y firmas de inversión, como Merrill Lynch y Bank of America, promueven al agua embotellada como la inversión que genera mayor retorno por dólar invertido (Greene, 2021).

A pesar de que esta gran industria global genera ganancias billonarias es responsable de problemas económicos, sociales y ambientales además de conflictos de orden institucional y político. Puesto que los plásticos forman parte de una cadena productiva mundial que afecta a los ecosistemas y a los seres humanos, es indispensable conocer los efectos sociales y ambientales de todas las etapas del ciclo de un producto plástico (PNUMA, 2021)

Para gran parte de la población el agua embotellada es la única fuente segura de agua potable (Greene, 2018). De hecho, la compra de agua embotellada significó un desembolso trimestral de entre \$354 y \$575 per cápita para Ciudad de México en el año 2012 (Pacheco-Vega, 2015). De hecho, el precio del agua embotellada (por volumen) es 235 veces superior que la tarifa de agua municipal de Ciudad de México (Rodríguez-Tapia et al, 2017). Este gasto, sin embargo, no repercute por igual a las familias: Revollo-Fernández et al (2021) calculan que las familias más pobres gastan 3.25% de su ingreso en agua embotellada mientras que las más ricas gastan el 0.45% de su ingreso; Delgado Ramos (2010) comenta que para el sector más pobre de la población mexicana, el gasto por agua puede representar entre el 10 y el 20% de los ingresos de un salario mínimo.

---

<sup>1</sup> En la mayoría de países, un billón se refiere a un millón de millones. En EUA, Brasil, Grecia, Turquía billón se refiere a mil millones. En este trabajo se usará como referencia a EUA.

En contraposición, se encuentran los beneficios privados de la industria del agua embotellada: se reporta que en 2014 se vendieron 290 billones de litros, cuyas ventas significaron \$170 billones de dólares para los productores (Dunmade, 2017); se prevé un aumento del consumo mundial para 2023 hasta 501 billones de litros (Statista.com consultado el 4/03/2022). De hecho, se considera que en México “el mercado del agua embotellada es uno de los más rentables de todo el sistema económico nacional” (Lemus, 2020). Las ganancias se deben, en parte, a la discrecionalidad del gobierno al otorgar las concesiones muy baratas para la explotación de los mantos acuíferos, a partir de las cuales se obtienen enormes ganancias (Lemus, 2020; Reyez, 2017).

Se han documentado conflictos sociales en comunidades donde se han instalado plantas embotelladoras. Los conflictos son de diversa índole como amenazas de muerte, intimidación y persecución, extorsión, secuestros, extorsiones, amenazas, desapariciones, encarcelamiento migración forzada, incremento del trabajo infantil, incremento de las horas dedicadas a acarrear agua, aumento de enfermedades diarreicas, y hasta la existencia del llamado Cártel del Agua, entre otras (Lemus, 2019; COMDA, 2017; Nestlé, 2009 consultado el 5/5/2020; CONAGUA, 2018). Lemus (2019) reporta que en Ciudad de México, 78 ambientalistas de la defensa del agua se encuentran amenazados de muerte. En Iztapalapa, zona de bajos recursos en el oriente de Ciudad de México, se han registrado enfrentamientos violentos entre la población para apoderarse de pipas de agua (Azamar Alonso, 2017).

La problemática ambiental que causa el agua embotellada gira en torno a los siguientes temas principales: el origen no renovable de las materias primas usadas para fabricar la botella y los energéticos para el transporte; el agotamiento de acuíferos y, en el caso de Ciudad de México, la problemática generada por la importación de agua de cuencas cercanas; la contaminación de aire, tierra y agua que se originan en todas las etapas de procesamiento, transporte y desecho del agua embotellada y de su envase; los efectos tóxicos del PET y aditivos químicos y finalmente, la acumulación y ubicuidad de residuos de macro y micro-plásticos en el ambiente.

Tanto para fabricar el PET como para transportar materias primas y productos se requiere petróleo y gas, ambos son recursos no renovables cuyas reservas que están a la baja. Al mismo tiempo, se prevé un crecimiento continuo y exponencial de los plásticos: para 2013 la industria mundial del plástico de empaques produjo 78 millones de toneladas; se espera que para 2028 se duplique la producción y para 2050, se multiplique cuatro veces (World Economic Forum *et al*, 2016).

Y aunque podría pensarse que el pronóstico a la baja de las reservas de petróleo es una desincentivo para la industria del plástico, este sector está reaccionando de forma contraria: ante la posible reducción de la demanda global de combustibles fósiles por el aumento de producción de energías renovables, se prevé que el petróleo se destine a los petroquímicos, entre los cuales se encuentra el plástico.

En efecto, desde 2010 se han invertido billones de dólares en proyectos petroquímicos nuevos en EUA (Gardiner, 2020 consultado el 15/1/2020) como el llamado corredor petroquímico de la costa del Golfo (Bruggers, 2022), por lo que se pronostica que para 2050 el porcentaje de petróleo destinado a los petroquímicos crezca hasta niveles entre 20% (World Economic Forum *et al*, 2016) y 50% del total consumido (Gardiner, 2020 consultado el 15/01/2020), contrastando con el 14% actual. Se cuenta, además, con el etano extraído como producto del fracking, principal materia prima para producir plásticos, incluyendo el PET (Gardiner, 2020 consultado el 15/01/2020).

Cabe resaltar que durante la pandemia del COVID-19 se registró un aumento en la demanda de plásticos y sus desechos que ha provocado un colapso mundial en las cadenas de gestión de desechos. Además, el confinamiento causó una baja en la demanda de petróleo y por consiguiente de su precio de mercado; esto tiene un doble efecto negativo que es el aumento de la producción de productos plásticos con materia prima virgen y la disminución de rentabilidad de las instalaciones de reciclaje (PNUMA, 2021).

La problemática del agua en Ciudad de México es particularmente grave ya que el consumo de agua depende mayoritariamente de las extracciones de agua subterránea del acuífero de la Zona Metropolitana de Ciudad de México, que para 2020 presenta un grado de sobreexplotación cercano al 100%<sup>2</sup> (calculado con información de CONAGUA, 2020); a pesar de ello en 2016 este acuífero proveyó el 41% del volumen total requerido por la ciudad (DOF, 2016). Para abastecer el resto del volumen, se tiene un modelo hidráulico operativo basado en “la importación y transferencia de grandes caudales de agua” de diferentes poblaciones, que son afectadas por la disminución del caudal de agua (Perló Cohen *et al*, 2005); en 2016 la principal fuente externa de agua fue el Sistema Cutzamala, abasteciendo casi el 32% de la demanda de la ciudad (DOF, 2016).

El uso del agua subterránea del acuífero tiene como efectos negativos la disminución de los niveles de agua subterránea, la modificación del sistema de flujo subterráneo, abatimiento del nivel freático con la consecuente disminución de caudal y rendimiento de pozos e incremento de los costos de extracción (DOF, 2016). Adicionalmente, existen consecuencias secundarias a la sobreexplotación del agua subterránea, como las subsidencias o hundimientos del terreno<sup>3,4</sup>, formación de cavernas, contaminación, deterioro y/o salinización del agua; desecación parcial o total de manantiales, aceleración de la erosión y pérdida del suelo; alteración del microclima, desaparición de vegetación nativa, disminución de rentabilidad de actividades agrícolas, destrucción del equipamiento urbano,

---

<sup>2</sup> En el Anexo I se presentan los diferentes indicadores del estado del acuífero de la Ciudad de México.

<sup>3</sup> Los mayores hundimientos se ubican en las alcaldías Azcapotzalco, Iztapalapa, alrededores del Aeropuerto Internacional Benito Juárez, Xochimilco, y las cercanías de la zona del Gran Canal del Desagüe y del Río Churubusco, aunque también los hay en menor medida en Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Benito Juárez, Iztacalco y Venustiano Carranza (Perló Cohen *et al*, 2005).

<sup>4</sup> Consecuencia derivada del hundimiento del suelo es el aumento de costos de mantenimiento y operación del drenaje profundo, y también el mantenimiento continuo de infraestructura urbana como líneas de metro, avenidas y pasos a desnivel (DOF, 2016).

incluyendo daños severos en algunas viviendas (Domínguez *et al*, 2007; DOF, 2016; Delgado, 2007; Soto-Montes de Oca, 2007; Hernández Chávez, 2017).

Uno de los efectos visibles del consumo de agua embotellada es la generación de residuos sólidos. Geyer *et al* (2017) reportan que aproximadamente 42% de todos los plásticos fabricados desde el inicio de la industria plástica (predominantemente el polietileno, polipropileno y PET) ha sido usado para empaques; de estos, el PET acumula 65.8% de la participación en el mercado de los no retornables (INEEC-GIZ, 2013). La UNEP (2018) estima que, del total de los plásticos producidos a lo largo de la historia, se han desechado el 60%. En la actualidad, la mitad del plástico producido, PET incluido, está diseñado para usarse una sola vez (UNEP, 2018). Debido a que la industria del agua y bebidas embotelladas usa mayoritariamente botellas de PET, que están diseñadas expresamente para desecharse después de su uso, es una de las principales industrias generadoras de residuos plásticos (CCE, 2005; Montero-Contreras, 2015). De hecho, en 2016, se vendieron en el mundo alrededor de 480 billones de botellas de plástico, lo equivalente a un millón de botellas por minuto (BBC, 2017; UNEP, 2018) y únicamente un 14% del total mundial de los empaques de plástico fue colectado (World Economic Forum *et al*, 2016). Se cree que el consumo mundial de empaques de PET llegará a 20.8 millones de toneladas en 2027 (Masoumi *et al*, 2022).

Los residuos plásticos tienen un gran impacto ambiental pues, una vez generados, se convierten en un problema multigeneracional debido a su largo tiempo de degradación; las consecuencias se pueden observar en el suelo, cuerpos de agua y ecosistema en general, daños en la salud humana y animal, en el costo de limpieza y la contaminación causada por el transporte de los mismos residuos (UNEP, 2014). World Economic Forum *et al* (2016) estima, conservadoramente, que el costo ambiental global de los empaques plásticos, incluyendo únicamente emisiones de gases de efecto invernadero y efectos pos-consumo, puede llegar a \$40 billones de dólares anuales.

Una secuela de la generación de residuos plásticos es la formación de micro o nano plásticos, debido a que los plásticos pueden romperse o degradarse por la acción del intemperismo y la luz, y producir partículas de plástico de diferentes formas y tamaños, siendo el PET y el polipropileno los más frecuentemente detectados (World Health Organization, 2019).

Los microplásticos pueden producir alteraciones en el ambiente por la sola presencia de partículas extrañas (alteración de tipo físico); por la presencia de sustancias químicas como monómeros residuales de la reacción y aditivos añadidos, así como la posibilidad de facilitar la formación de conglomerados de químicos residuales presentes en el agua (alteración de tipo química); y alteraciones de tipo biológico, por posibilitar la formación de colonias de microorganismos (World Health Organization, 2019). De hecho, existe evidencia de la presencia de plástico en el agua potable, aire, suelos, lluvia, comida y también en el agua embotellada (World Health Organization, 2019).

Por otra parte, una de las áreas menos visibles y estudiadas de la industria del agua embotellada es la referente a los efectos tóxicos de los plásticos en la salud. En términos generales, la toxicidad de una sustancia depende de sus propiedades físicas, como tamaño, área superficial, forma, características superficiales, así como de sus características químicas. El riesgo a la salud de un compuesto químico depende de la toxicidad y del tiempo de exposición (World Health Organization, 2019). Particularmente, se ha encontrado evidencia de efectos a la salud relacionada con los ftalatos, como estrogenicidad, disminución de la testosterona, estrés oxidativo, partos prematuros, diabetes gestacional, obesidad, enfermedad cardiovascular, endometriosis e infertilidad; además es probable que sea la causa de mortalidad cardiovascular en adultos. Las pérdidas económicas por disminución de la productividad pueden ser mayores a \$40 billones al año (Trasande et al, 2022).

La cuestión de los residuos sólidos es un problema importante para Ciudad de México porque hoy en día, la ciudad no cuenta en su territorio con un Sitio de Disposición Final<sup>5</sup> (SDF) de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), por lo que los envía a los SDF La Cañada, Cuautitlán, El Milagro y Xonacatlán en el Estado de México (60-70%), y a Tepoztlán y Cuautla, en Morelos (30-40%) (Mora Reyes, 2004; Quintana Noriega, 2016). No obstante, esto no es gratuito: llevar la basura a un relleno sanitario en el Estado de México cuesta entre \$360/tonelada (SEDEMA, 2016) y \$430/tonelada (Reveles, 2018). A favor de esto se tiene que México es líder en Latinoamérica en acopio y reciclaje de PET, logrando un 53% a nivel nacional y 96% en Ciudad de México (Ecología y Compromiso Empresarial, AC consultado el 6/9/2021). Esto es, según Ecología y Compromiso Empresarial, AC (ECOCE), en Ciudad de México no se estaría usando espacio en los sitios de disposición final para almacenar desechos de PET generados actualmente, aunque sí estaría usando combustible para el transporte de dichos residuos. El reciclaje de plástico se realiza, mayoritariamente, por métodos mecánicos (que incluye colecta, selección, limpieza, molienda, trituración, fundición, moldeado) y métodos químicos (con uso de calor u otros químicos) y biológicos (algas, hongos); no obstante, como todo proceso, consumen energía, materias primas, requieren combustible, son muy caros, contaminan y no existe capacidad para procesar todos los residuos plásticos, que como ya se ha explicado, están en continuo aumento. Además, hay que ser cuidadosos pues aun cuando un plástico pueda ser reciclable o compostable, eso no necesariamente implica que en realidad sí exista infraestructura adecuada para realizar el reciclaje o composteo.

Adicionalmente, la industria del agua embotellada contribuye a la contaminación de aire, agua y suelo, generada principalmente en los procesos de producción de materias primas y del transporte de los productos. La contaminación del aire se debe principalmente a la combustión de hidrocarburos fósiles, que es el principal generador de gases de efecto

---

<sup>5</sup> Actualmente, todos los sitios de disposición final de residuos para Ciudad de México ya cerraron: Prados de la Montaña (cerró en julio de 1994), Santa Catarina (cerró en 1995) y Bordo Poniente (cerró en 2014) (Mora Reyes, 2004; Quintana Noriega, 2016).

invernadero causante del actual calentamiento global; esta combustión se da tanto en los procesos industriales de transformación como durante la distribución de productos. De hecho, se calcula que la industria del plástico es responsable del 4.5% de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial (Cabernard et al, 2021), por su parte en Bruggers (2022) se reporta que la señala que industria del plástico de Estados Unidos fue responsable de la emisión de 232 millones de toneladas de CO2 en 2020. La contaminación del agua puede darse por tres vías: durante los procesos químicos de producción de materias primas y productos (agua de lavado, enfriamiento, calentamiento), por derrames en el mar durante el transporte de hidrocarburos, y por la contaminación que causan en los cuerpos hídricos los plásticos, microplásticos y aditivos químicos que pueden desprender los mismos plásticos o que se pueden adherir a la superficie de los desechos (World Health Organization, 2019). La contaminación de suelo se debe tanto al suelo destruido para la instalación de la infraestructura para los procesos de producción, transporte, distribución del producto, el espacio para los rellenos sanitarios usados para depósito de los residuos, y además, las consecuencias por la contaminación por derrames de químicos, y la deposición de partículas de plásticos y microplásticos en el suelo.

Dado el gran consumo de agua embotellada y de las consecuencias al ambiente de esa industria, se hace evidente la necesidad visibilizar este problema y de evaluar de forma amplia e integral los daños ambientales a lo largo de la cadena productiva o el ciclo de vida del producto, esto es, desde la extracción y procesamiento de las materias primas, la manufactura y distribución del producto y hasta el desecho de los residuos.

A este razonamiento integral e conoce como Concepto de Ciclo de Vida (Life Cycle Thinking) y se refiere a una forma de pensar o marco de referencia que promueve una evaluación holística e integral de los impactos ambientales que un producto, proceso, actividad o servicio producen en el ambiente, sociedad y economía (Plastics Europe, consultado el 20/4/2022); a la cuantificación metodológica y estandarizada de uso de recursos y descarga de emisiones ambientales de algún proceso se le llama Análisis de Ciclo de Vida (ACV), en inglés conocido como Lyfe Cycle Assessment.

En este trabajo se hace uso de información de ocho estudios publicados de ACV para agua embotellada y, conjuntamente con información de costos ambientales para categorías de impacto individuales obtenidos de diferentes fuentes especializadas, se estiman los costos ambientales del agua embotellada, específicamente para Ciudad de México. Para ello se presentan tres secciones: el marco teórico, el marco metodológico y una última parte donde se exponen los resultados, discusión y conclusiones.

El **marco teórico** se subdivide en tres partes: la primera parte aborda las causas del aumento en el consumo de agua embotellada en Ciudad de México desde un punto de vista histórico, sección importante para conocer las causas que originaron y permiten la perpetuación de este fenómeno. En la segunda parte se hace un acercamiento a la problemática ambiental específica del agua embotellada, incluyendo el agotamiento de recursos naturales no renovables, y la contaminación de aire, agua, suelo y por residuos sólidos. En la tercera

parte se define el marco teórico que se usará para estudiar el problema del agua embotellada desde una perspectiva económica.

El **marco metodológico** se subdivide en cinco secciones: la primera sección se refiere a la búsqueda de información e identificación de los daños ambientales causado por el agua embotellada. Este paso se hace a partir de estudios de Análisis de Ciclo de Vida publicados por diversos autores en una suerte de meta-análisis, mismos que sirven para definir los límites del sistema y para hacer la identificación de las categorías de impacto ambiental que se van a usar en el trabajo. Por último se presentan los cálculos para homogeneizar la información en una misma unidad de referencia o unidad funcional. En este caso, la unidad funcional es una botella de PET con un litro de agua embotellada.

En la segunda sección se realizan algunos cálculos auxiliares preliminares, necesarios para poder completar las secciones posteriores. Son básicamente balances de materia relacionados con la producción de agua embotellada, y se usa información obtenida por los resultados de ACV y de otras fuentes adicionales. Estos resultados también se homogenizan a una misma unidad funcional. Se optó por separar esta sección para hacer más simple y fluida la lectura de las otras secciones.

En la tercera sección se investiga en diferentes fuentes los costos para las categorías de impacto ambiental definidas previamente y se hace la actualización de precios, a un año base 2013. Por último se calculan los precios unitarios, esto es, por unidad de masa, para homogeneizar la información: pesos por barril para el costo de agotamiento de petróleo; pesos por metro cúbico de agua para el agotamiento de agua subterránea y la contaminación de agua de proceso, pesos por kilogramo de residuos sólidos urbanos, pesos por kilogramo de CO<sub>2</sub>eq para la contaminación atmosférica, pesos por kilómetro cuadrado para la contaminación del suelo.

En la cuarta sección se realizan los cálculos de costos ambientales de cada una de las categorías de impacto ambiental para la unidad funcional, que es una botella de PET de 1 litro de volumen, que es la referencia elegida para este trabajo.

Los **resultados** se exponen en la tercera sección y son cuatro: el primero y más importante, es el costo ambiental promedio de una botella de agua. A partir de este se obtienen los demás resultados.

El segundo resultado, se obtiene al hacer una comparación del costo ambiental del agua embotellada respecto al precio promedio de mercado. Este valor equivale a un impuesto ambiental, y es importante para establecer políticas públicas.

El tercer resultado se obtiene cuando el costo ambiental promedio se presenta desglosado por categoría de impacto ambiental -con lo que se puede evaluar la importancia relativa entre impactos- y por envase-producto -con lo que se determina su contribución individual al costo ambiental promedio. Este desglose es interesante e importante para el análisis de

distribución de responsabilidades, priorización de solución y para definir impuestos ambientales diferenciados.

Como cuarto resultado se presenta una estimación del costo ambiental total anual de la industria del agua embotellada en Ciudad de México. Esto es interesante como una forma de visibilizar la magnitud de la problemática planteada.

Como parte final de la tesis se incluye un capítulo de discusión, donde se resume las limitaciones de la metodología, el alcance e implicaciones de los resultados; y finalmente un breve capítulo de las conclusiones obtenidas.

## HIPÓTESIS

---

La hipótesis de este trabajo se formula como pregunta: ¿Cuál es el costo ambiental del agua embotellada en Ciudad de México, considerando todo su Ciclo de Vida?

## OBJETIVOS

---

### **Objetivo General**

El objetivo general de este trabajo es estimar el costo ambiental de la industria del agua embotellada en Ciudad de México a lo largo de su ciclo de vida.

Los **Objetivos Específicos** son:

Investigar sobre la situación de la industria del agua embotellada en el mundo, en México y en Ciudad de México.

Identificar cuáles han sido los motivos del aumento del consumo de agua embotellada en el mundo y en particular, en Ciudad de México.

Investigar los estudios ya existentes de Análisis de Ciclo de Vida de la industria del agua embotellada en el mundo.

Investigar estudios específicos existentes de contabilidad ambiental para los impactos ambientales relacionados con el consumo de agua embotellada.

Obtener el costo ambiental de cada botella de PET de un litro de volumen de agua embotellada.

Comparar el costo ambiental de cada botella respecto al precio de venta promedio.

Determinar los costos ambientales para el empaque (PET) y para el contenido (agua).

Calcular el costo ambiental total de la industria de agua embotellada en Ciudad de México.

Visibilizar el problema del agua embotellada en Ciudad de México.

## ALCANCES

---

Como en todo trabajo, existen ciertos alcances y limitaciones, a saber:

Se utiliza información de Análisis de Ciclo de Vida del agua embotellada ya disponibles en literatura. Al realizar la búsqueda de información se encontraron ocho estudios de diferentes países y años, con información útil; esta información se compila y maneja para identificar y cuantificar los impactos ambientales del agua embotellada. Sin embargo, por no haber realizado un ACV específico para Ciudad de México, los resultados obtenidos deben considerarse preliminares y generales.

Se utiliza información de costos ambientales ya existente disponible en literatura. A este procedimiento se le llama Transferencia de Beneficios, que es usar la información y resultados de otras investigaciones para estimar los costos ambientales en Ciudad de México. Esto se hace sobre todo cuando no existen datos no se tiene ni tiempo ni dinero para obtenerlos por medio de una investigación propia. Como ventaja de este método se tiene el que es un método barato y rápido; la desventaja es que no es específico para las circunstancias particulares de cada problema, por lo que los resultados pueden tener cierto grado de incertidumbre.

En los límites del sistema no se incluye el reciclaje del PET. Esto es necesario para obtener resultados del caso base, esto es, únicamente la producción, consumo y disposición final de residuos del agua embotellada. Sería muy interesante incluir este rubro en un siguiente estudio.

No se incluye el costo del efecto toxicológico del PET, por ser un tema emergente y carecer de información científica. La mayoría de los estudios sobre este tema son para plásticos en general, y no existe ningún estudio científico ni tampoco de valoración económica sobre los efectos toxicológicos del PET ni de sus residuos en humanos y en el ecosistema.

Este estudio se enfoca en particular a Ciudad de México, por lo que se considera de forma particular el costo del agotamiento del agua del acuífero y el costo ambiental de la importación de agua superficial desde el Sistema Cutzamala; se considera, además, el costo de gestión de residuos sólidos urbanos para la ciudad.

No se cuenta con información específica sobre las distancias recorridas de transporte de proceso, de distribución y doméstico específico para el agua embotellada en Ciudad de México.

Los resultados se obtienen para el año base 2013. Esto no representa problema para los resultados de ACV porque son valores meramente técnicos; y los costos ambientales obtenidos se pueden actualizar fácilmente con algún índice, en caso de así requerirlo.

La unidad funcional elegida es una botella de PET de 1L. La unidad funcional se define para contar con una referencia común para todos los cálculos. Esta unidad funcional se eligió por ser práctica y porque es de una dimensión muy humana, que se puede relacionar directamente con el consumo diario por persona.

La selección de categorías de impacto se realizó de acuerdo a la relevancia ambiental y considerando la información de costos externos disponibles. Estas son:

- Consumo de energía, como indicador del agotamiento de petróleo
- Consumo de agua bebible, como indicador de agotamiento de agua subterránea
- Cantidad residuos de PET, como indicador de residuos sólidos urbanos
- Potencial de calentamiento global (PCG), como indicador de las emisiones de gases a la atmósfera (contaminación atmosférica)
- Consumo de agua de proceso, como indicador de contaminación del agua
- Ocupación de tierra arable, como indicador de contaminación de suelo

# I. MARCO TEÓRICO

---

*“Los plásticos son un ícono de la economía moderna”  
World Economic Forum et al, 2016*

La relación inversa que existe entre la calidad ambiental y la producción de mercado se debe a que el medio ambiente es un insumo más para el sistema productivo, por lo que una disminución en la calidad y/o cantidad de recursos naturales afecta negativamente el sostenimiento del sistema económico; y en sentido inverso, un exceso de producción, provoca una sobrecarga, alteración y hasta destrucción del medio ambiente. Así, la economía y la ecología están interconectadas de forma local, regional, nacional y global, tanto en las causas como en los efectos. De hecho, Naciones Unidas (UN, 1987) considera que las diferentes crisis globales de la actualidad (ambiental, de desarrollo, energética) son una misma crisis, consecuencia de los efectos de las actividades humanas, que permean a todo el mundo sin reconocer fronteras, y representa un riesgo para la seguridad y supervivencia global.

Una de las mayores barreras para el apoyo mutuo entre la economía con la ecología ha sido la creencia de que ambos campos del conocimiento no se necesitan entre sí y pueden funcionar de manera separada (Costanza *et al*, 1997). La adopción de enfoques multidisciplinarios para el estudio de cualquier problemática, provee soluciones mejor fundamentadas y de mayor alcance a la solución de problemas complejos.

En este capítulo se analizan las herramientas teóricas que se usan en este trabajo tanto para el análisis histórico, ambiental como para el económico.

## A. MARCO HISTÓRICO: CAUSAS DEL CONSUMO DE AGUA EMBOTELLADA EN CIUDAD DE MÉXICO

Las razones que han propiciado el crecimiento imparable del consumo de agua embotellada son motivo de estudio a nivel global.

Para Greene (2014), el crecimiento de la industria de agua embotellada es un reflejo de la contaminación y sobreexplotación de los recursos hídricos. Para Ashurst *et al* (1998) el consumo de agua embotellada está impulsado por condiciones históricas, geográficas, por la disminución del manto freático y por la contaminación de las fuentes de abastecimiento. Para Jaffee *et al* (2012) las razones son dependientes de las particularidades de cada país, se pueden resumir en: cambios en estilos de vida, que incluyen la elección de una vida más saludable y la necesidad de comer fuera de casa; aumento de la mercadotecnia que apela a la seguridad, pureza, salud y estatus social; y el poco mantenimiento de las redes públicas de agua, lo que genera suspicacias respecto a la calidad de agua. Para Hawkins *et al* (2015), el mercado del agua embotellada no pudo haber despegado sin el desarrollo de la botella de PET, y lo considera un mecanismo de mercado, como un actor con capacidades emergentes y que provoca múltiples efectos espacio-temporales; aunado a su facilidad de producción y bajo precio comparado con otros envases más pesados, lo que lo convirtió en

un transformador del mercado de bebidas. Ortega Castañeda (2016) explica que existen factores exógenos que promueven el aumento del consumo de agua embotellada, como por ejemplo la tendencia global de consumo ascendente, la mercadotecnia, el efecto de sustitución de bebidas azucaradas, mejora del poder adquisitivo, falta de alternativas o por situaciones de emergencia.

La situación del alto consumo de agua embotellada en México ha sido estudiada ampliamente por diversas instituciones e investigadores, y en sus análisis exponen que las causas se pueden resumir en la deficiente calidad y cantidad del servicio de agua municipal, la incertidumbre de la población acerca de la calidad del agua, la falta de credibilidad hacia el gobierno, el manejo asimétrico de la información de las empresas privadas, por el desempeño ineficiente del Estado para garantizar el derecho humano al agua (Montero-Contreras, 2015; González-Villareal, 2016; Montero-Contreras, 2016, Ortega Castañeda, 2016). Montero-Contreras (2016) asegura que el consumo no está relacionado con el ingreso de la población. Ortega Castañeda (2016) plantea que, aunque la causalidad del problema del agua embotellada puede atribuirse a múltiples aspectos, el origen del problema es la falla de gobierno, tanto de derecha como de izquierda, en cumplir la provisión de agua potable a la población con sus características de salubridad, suficiencia, aceptabilidad, accesibilidad y asequibilidad, junto con la información oportuna sobre la calidad del agua. Esto es, el agua embotellada cubre el vacío gubernamental en el tema del agua potable.

Son varias y muy particulares las causas por las que Ciudad de México ha llegado a tener altos índices de consumo de agua embotellada (Greene, 2014; Montero-Contreras, 2016; Sánchez Villavicencio, 2016):

i. Se puede afirmar que el detonante de este fenómeno en Ciudad de México fue el temblor de 1985, por el daño a la infraestructura de suministro público de agua. Se estima que 5.3 millones de personas se quedaron sin agua. De hecho, se estima que se rompieron 60 tuberías principales, sobre todo del sureste de la ciudad, comprometiendo el suministro y la calidad del agua entregada; también se destruyeron varios edificios de la administración pública, incluyendo los de la Comisión Nacional de Agua. La destrucción de las tuberías no sólo afectó el suministro de agua, sino que permitió que el agua potable se contaminara por las infiltraciones de lluvias y aguas negras. Ante esto, el mismo gobierno recomendó a la población hervir el agua o comprar embotellada, mientras se reparaban las tuberías; lamentablemente, cuando las tuberías fueron reparadas, el gobierno no dio aviso a la población con lo que el hábitos de consumo de agua embotellada continuó (Greene, 2014; Montero-Contreras, 2016).

ii. En 1991 resurgió en México el cólera como parte de la séptima pandemia (Jiménez-Corona et al, 1995), por la cual enfermaron cientos de personas; se calculan 45998 muertos a lo largo de 10 años, aunque se cree que el gobierno reportó menos del 10% de los casos (Sánchez Villavicencio, 2016). Las consecuencias de la enfermedad se magnificaron por la dispersión de aguas negras hacia las tuberías no reparadas desde el sismo del 85, por lo que el gobierno de nuevo recomendó a la ciudadanía el consumo de agua embotellada. A partir

de esa fecha se aumentó la concentración de cloro en el agua con lo que se afectaron las propiedades organolépticas del agua, alentando aún más el consumo de agua embotellada.

Lamentablemente, el gobierno no informó a la ciudadanía cuándo ya era seguro volver a tomar agua entubada, por lo que la población continuó comprando agua. “México no mejoró la infraestructura hidráulica a partir de la epidemia de cólera; mucha de ella de la era colonial. Donde el gobierno falló al actuar, la industria sí actuó” (Greene, 2014), de tal forma que la desconfianza en el gobierno actuó como catalizador para el despegue del agua embotellada en México. “En 1991 la Revista Forbes reporta al agua embotellada como gran ganadora de la epidemia de cólera” (Sánchez Villavicencio, 2016). Dicho autor considera que los factores que han llevado al deterioro de la infraestructura hidráulica han sido la falta de inversión en las redes ya existentes y el crecimiento desmedido de las grandes urbes; el Banco Mundial considera que mucho del problema de la infraestructura se debe al infraprecio del agua pública (Greene, 2014).

iii. La crisis financiera que empezó en 1982 y siguió hasta 1994. En este período se dieron simultáneamente varios acontecimientos como el déficit presupuestario, fuga de capitales, falta de inversión, crisis de deuda externa. Las instituciones financieras mundiales que prestaron dinero al país para sobreponerse a la crisis impusieron condiciones restrictivas a la ampliación de la infraestructura, incluyendo el sistema de aguas pública, como parte de una serie de recortes por 5 años en el sector público. Esta crisis financiera se da a la par del comienzo del neoliberalismo.

iv. En el sexenio de Salinas de Gortari (1988-1994) se firma el Tratado de Libre Comercio de América del Norte, e inicia en México la época neoliberal en México que se caracteriza, entre otras cosas, por una menor participación del estado en la economía, flexibilización de las políticas de inversión extranjera, una mayor participación del sector privado en muchos sectores de la economía, privatización de bienes públicos (Montero-Contreras, 2016). En 1992 se reformó la Ley de Aguas Nacionales permitiendo la concesión del derecho de uso y administración de las aguas nacionales al sector privado, incluyendo las embotelladoras extranjeras (Lemus, 2019; Greene, 2014; Montero-Contreras, 2016).

Esta tendencia privatizadora continúa con la política de Vicente Fox, creador del PROMAGUA, un programa financiado con \$250 millones por el Banco Mundial para lograr la privatización de los recursos hídricos del país y el cambio de la administración pública del agua en las grandes ciudades, por una administración privada<sup>6</sup>. En Ciudad de México el agua pública empezó a ser manejada por cuatro compañías privadas, a saber: Suez, Vivendi, United Utilities, Severn Trent, afiliadas a transnacionales, asignadas sin consulta pública (Barkin, 2004).

---

<sup>6</sup> También se ha acusado al expresidente Fox de hacer entrega de concesiones de agua a sus “amigos”, con las que podían extraer cantidades ilimitadas de agua subterránea, con trámites simplificados (Greene, 2014). De hecho, el mayor crecimiento de Coca-Cola en México se dio durante la presidencia de Vicente Fox, que años antes fue presidente de Coca-Cola, pues pasó de tener 10 a 54 títulos de concesión (Lemus, 2019).

En 2018 Peña Nieto establece, mediante decreto presidencial, la libertad de acceso al uso de agua con fines industriales; en dicho el sector refresquero creció 5%, esto es, 12.5 veces más que el promedio de la industria nacional en conjunto (Lemus, 2019).

Al inicio de la administración de López Obrador, que se ostenta ser anti-neoliberal, se pretendía hacer una revisión a fondo sobre las inconsistencias financieras de los últimos 12 años de la CONAGUA y sobre las inconsistencias en el otorgamiento de concesiones de uso de agua, todo a partir de las observaciones de la Auditoría Superior de la Federación; sin embargo, el 23 de marzo de 2019 hubo un incendio en las instalaciones de CONAGUA, durante el cual se quemaron los registros de fiscalización y cobro de recursos por la concesión de agua potable para manejo industrial (Lemus, 2019).

A pesar de lo anterior, en esta administración se han dejado de entregar concesiones de uso de agua a particulares (Diario Rotativo, consultado el 13/9/2022) y, específicamente para Ciudad de México, se retiraron concesiones a 4 compañías de gestión del agua, quedando el control a cargo del gobierno de la ciudad y de Sistema de Aguas de Ciudad de México (Forbes, 2021, consultado en 8/3/2022). Esto es, en esta última administración no se ha registrado ningún cambio sustancial que afecte la tendencia de alto consumo de agua embotellada en la capital del país.

La emergencia sanitaria provocada por el COVID-19 ha provocado un incremento en el consumo de agua embotellada, de envases desechables de alimentos, de mascarillas desechables y de insumos médicos. La falta de acceso a instalaciones de saneamiento así como problemas de la calidad y cantidad de agua, profundizan la problemática de la población vulnerable frente al COVID-19 (Greenpeace, 2021 consultado el 8/3/2022). Muchos lugares que ya tenían implementado el uso de bebederos públicos, los cerraron para evitar incrementar la transmisión del virus.

v. La llegada, en la década de los ochenta, de las embotelladoras transnacionales europeas, en su primera ola expansiva más allá de Europa; en los noventa se incorporan al mercado mexicano las empresas americanas. En la misma época también se dan las fusiones entre empresas, con lo que se centraliza la producción y comercialización, en este caso, de agua embotellada (Montero-Contreras, 2015). Estas grandes empresas, se instalan en nuestro país, sacando provecho del marco legal laxo y deficiente (Sánchez Villavicencio, 2016). Según Montero-Contreras (2015) “las empresas trasnacionales se han consolidado en el mercado por su expansión gracias a alianzas, fusiones y adquisiciones de empresas, y el marco institucional favorable para la extracción de agua sin límite, a bajo costo, y con exenciones de impuestos” tanto de la red pública, como de manantiales y fuentes subterráneas.

Con el tiempo, las empresas mejoraron la eficiencia y control interno de las organizaciones con mejoras en los sistemas y herramientas informáticos y sus redes de distribución, y se conjuntaron equipos multidisciplinarios para ampliar la producción y ventas y disminuir los costos; ejemplo de ello es el sistema de logística desarrollado por Coca-Cola, posibilitando el acceso a puntos remotos del país (Montero-Contreras, 2016, Montero-Contreras, 2015).

La corrupción empresarial está documentada en las investigaciones periodísticas de Lemus (2019) que evidencian que el 47% de los entrevistados han pagado sobornos para agilizar trámites y permisos de uso del agua. Entre los coludidos se encuentran funcionarios federales y municipales, asesores particulares y hasta el crimen organizado, que ayudan a disuadir los movimientos sociales por medio de la persecución y violencia.

A la par de la corrupción de las empresas embotelladoras, está el enfoque institucional (Montero-Contreras, 2016) o “captura política” (Greene, 2014), que se refiere al comportamiento institucional que, por acción o por omisión, influye en las preferencias y cambios de consumo de la ciudadanía y también influyen en el desempeño de las transnacionales. Montero-Contreras (2016) sugiere que las instituciones que distribuyen agua potable “han hecho acuerdos informales con las transnacionales para manejar con mucha discrecionalidad la información relacionada con la calidad del agua favoreciendo así a las empresas privadas en detrimento de la población en general”. Y continúa: “una de las estrategias de las transnacionales es estar cerca de la clase política, de las organizaciones de la sociedad civil y de la sociedad en general, con el fin de cabildear”; la autora prevé a mediano plazo el dominio y consolidación de su poder oligopólico.

De hecho, las empresas de agua embotellada en México tienen regulaciones ambientales y de salud pública más relajadas que las que deben cumplir empresas de suministro de agua pública; además, no existe ninguna regulación para la industria de agua embotellada respecto al uso de aguas, etiquetado, empaque, distribución, o desecho de botellas, ni tampoco existe ninguna regulación hacia las corporaciones multinacionales (Pacheco- Vega citado por Ortega Castañeda, 2016).

Los productores de agua embotellada lograron imponer sus intereses por encima de los de la sociedad o el ambiente gracias a su poder económico y al cabildeo político (Ortega Castañeda, 2016). De hecho, la Asociación Nacional de Productores y Distribuidores de Agua Purificada, AC (andapac.com.mx) tiene entre sus logros “la desregulación del precio y la exención del pago del impuesto especial al agua, IEPS”.

Otro recurso de las empresas para afianzar su negocio es la publicidad, como se explica en el siguiente apartado.

vi. En los años 80 la publicidad en torno al agua embotellada fue dirigida a estratos socioeconómicos altos y con el tiempo pasó a un consumo generalizado en la sociedad, apelando al estilo de vida saludable, seguridad microbiológica, pureza, beneficios para la salud, disponibilidad y facilidad de transporte; con el tiempo se logró el cambio de hábitos en el consumo de agua en los hogares (Greene, 2014; Montero-Contreras, 2016; Sánchez Villavicencio, 2016). A este fenómeno se le ha llamado demanda manufacturada<sup>7</sup>, esto es, campañas de las embotelladoras para persuadir a la población de la necesidad de su producto (Sánchez Villavicencio, 2016). El éxito de la demanda manufacturada es tal, que aun países y ciudades reconocidas por su gran calidad de agua, optan por adquirir ese

---

<sup>7</sup> Término usado por primera vez por Annie Leonard en 2010, en el documental “La historia del agua embotellada” (Sánchez Villavicencio, 2016).

producto (Sánchez Villavicencio, 2016). Lamentablemente, la publicidad provoca distorsiones de la realidad y agudización del consumismo al subestimar o sobrevalorar productos (Mora-Reyes, 2004).

vii. Greene (2021), en un trabajo más reciente, considera que una forma más de propiciar el consumo de agua embotellada es la falta de acción del gobierno para invertir en la infraestructura hidráulica en áreas urbanas periféricas que han sido desbordadas debido al crecimiento poblacional y que obligan a la población a comprar el agua como única fuente confiable de abastecimiento. “Existe una relación directa, casi sinérgica, entre la expansión del agua embotellada como mercancía privada y el deterioro de los sistemas de agua pública” (Jaffe & Newman, 2013, citado por Greene, 2021). De hecho, también menciona que el total de la inversión federal para el sector de agua potable que en los últimos años era \$250 millones de dólares se redujo hasta \$150 millones en 2020; esto contrasta con el mercado mexicano de agua embotellada, que se estima en \$15 billones de dólares. Este autor afirma que el agua embotellada ha sido indirectamente subsidiada por el gobierno a un nivel mucho mayor que los servicios públicos de agua.

Adicionalmente, se debe considerar el uso de la infraestructura hidráulica pública por parte de las embotelladoras. En México las embotelladoras se abastecen del agua entubada provista por el estado y venden su producto directamente al consumidor, sin tener que negociar públicamente sus tarifas (Greene, 2014). Esto es, la industria del agua embotellada en México representa un nuevo método de proveer agua potable a la sociedad sin las ataduras que representa un sistema convencional centralizado de tuberías de suministro de agua potable, en el que existen riesgos y costos de instalación, operación y mantenimiento de equipos (Greene, 2014). Esto es relevante, ya que se estima que el costo de la infraestructura y mantenimiento representa el 85% del total de los costos del sistema centralizado de abastecimiento de agua, con lo que las industrias embotelladoras únicamente se hacen cargo de los gastos del tratamiento del agua, que no es más del 15% (Sánchez Villavicencio, 2016).

Esto es, los costos de instalación y mantenimiento son del gobierno y los ahorros de inversión representan ganancias para la industria privada. De hecho, a la industria de agua embotellada le llaman *La otra infraestructura hidráulica* (BID, 2011).

Otra consideración respecto a la infraestructura es que en Ciudad de México es imprescindible el consumo de botellas de agua porque en lugares públicos como aeropuertos, oficinas, museos, parques, calles, o privados como centros comerciales, no existe un suministro de agua potable para los transeúntes o visitantes, forzándolos a la compra de agua embotellada que, casualmente, se encuentran fácilmente en cualquier esquina (Pacheco-Vega, 2017).

## B. PROBLEMAS AMBIENTALES RELACIONADOS CON EL AGUA EMBOTELLADA

Actualmente los problemas ambientales son globales y ya llegan a grados alarmantes. Tienen su origen en diversas causas: el sistema económico que requiere ganancias continuamente creciente, el modo de vida de consumo masivo que hace uso inescrupuloso de recursos naturales y energéticos, los métodos de producción a gran escala, los productos desechables, la obsolescencia programada, el transporte de personas y mercancías, la construcción masiva de infraestructura, el crecimiento poblacional, la urbanización, entre otros.

Esta problemática tiene sus manifestaciones físicas como cambio climático, sobreexplotación de recursos, disminución de la disponibilidad de agua, desertificación, afectación en la salud de los seres vivos, pérdida de hábitat, aumento de gases de efecto invernadero, cambios fisicoquímicos en aire, agua y tierra por la generación; acumulación de sustancias tóxicas en la cadena alimenticia; agotamiento de suelo y disminución de la disponibilidad de agua dulce, extinción masiva de especies, la pérdida de hábitat, incremento de enfermedades debidas al estilo de vida y alimentación no saludable, agotamiento de recursos renovables y no renovables, y sus infinitas variantes. Además, el grado de las afectaciones dependerán del país, región, y hasta del nivel socioeconómico, de tal forma que los problemas ambientales generan problemas ecológico-distributivos o de “justicia ambiental” (Martínez-Alier, 2019).

De acuerdo al PNUMA (2021) “para comprender en su totalidad el alcance de las repercusiones sociales relacionadas con los materiales plásticos, es necesario conocer paso a paso las etapas del ciclo de vida útil del plástico, desde que se produce hasta que se desecha, y cómo afecta cada etapa”, por lo que en este capítulo se analiza la problemática ambiental directamente relacionada con la industria del agua embotellada en todas las etapas de producción, consumo y disposición final de residuos. El análisis se divide en dos temas principales: el agotamiento de recursos no renovables y la contaminación ambiental.

### 1. AGOTAMIENTO DE RECURSOS NO RENOVABLES

Los recursos no renovables incluyen los bosques y selvas, hidrocarburos, agua subterránea, algunos gases y minerales. Se consideran no renovables porque no se regeneran o porque no lo hacen a una velocidad suficiente tal que supere la extracción. En las siguientes secciones se explican cuáles son los recursos no renovables que son afectados por la industria del agua embotellada.

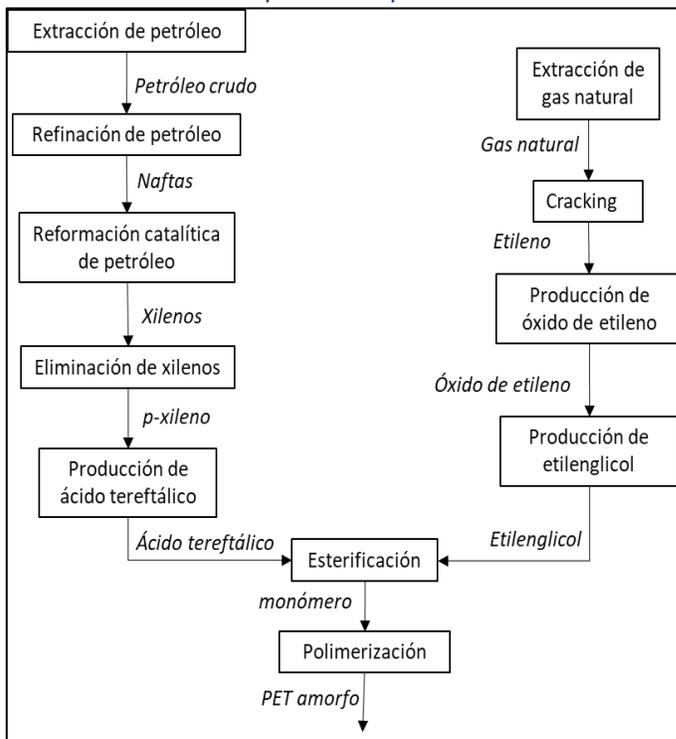
#### a) Hidrocarburos

Para producir agua embotellada se requiere energía: para hacer la botella, transportar, bombear agua, enfriar y reciclar. La cantidad de energía requerida depende de la localización y tipo de fuente de agua, la distancia del embotellador al consumidor, el tipo de material para el envase, el tipo de transporte, entre otros factores (Gleick et al, 2009).

El PET que se usa como envase para el agua embotellada, es un plástico cuya materia prima es el petróleo (y/o gas natural) y su producción se lleva a cabo en un proceso industrial, cuyas materias primas principales son el ácido tereftálico (TPA) y el etilenglicol (EG). Por lo mismo, generalmente los plásticos se producen en zonas geográficas cercanas a las refinерías (UNEP, 2021). El uso de combustibles fósiles es el origen de la mayoría de las categorías de impacto relacionadas con las emisiones (UNEP, 2010).

Para la producción de PET, se mezclan el etilenglicol con el ácido tereftálico a 150-200 °C, junto con un catalizador, trióxido de antimonio; la pasta formada se alimenta a una serie de tanques de esterificación a condiciones controladas; en estos reactores se forma el monómero bis-(2-hidroxietil)-tereftalato o (BHET); el metanol formado y el exceso de etilenglicol se recuperan por destilación. Este monómero luego se envía a una serie de reactores de polimerización o trans-esterificación, también a condiciones controladas a 270-280 °C, donde se produce el polímero de PET. El polímero aún fundido se envía a un extrusor, para formar filamentos del polímero que luego se enfrían, cortan, enrollan o forman pellets (EPA, 2019). En la Ilustración 1 se muestran todos los procesos necesarios para la producción del PET amorfo.

*Ilustración 1 Procesos para la de producción de PET*



Fuente: EPA, 2019

Para la fabricación de la botella, los pellets grado amorfo se funden en un molde con forma similar a un tubo de ensayo con rosca (que va a ser el cuello de la botella) y se produce una pre-forma; este proceso se llama moldeado de inyección. Posteriormente, esta pre-forma

se mete en un molde, se calienta para hacer elástico al material y se le sopla para que tome la forma del molde; inmediatamente se tiene que enfriar (EPA, 2019).

La producción y reservas de hidrocarburos son indispensables para la industria del plástico prevalente. Diversos estudios estiman que para la fabricación de plásticos se requiere entre el 4% (UNEP, 2014) y el 6% (World Economic Forum *et al*, 2016) del consumo global de petróleo<sup>8</sup>, esto es, el equivalente destinado al consumo del sector aviación; y sobre todo porque el 90% de los plásticos producidos mundialmente provienen de materia prima virgen (World Economic Forum *et al*, 2016).

Particularmente en México las reservas 3P (probadas, probables y posibles) registraron una disminución promedio anual de 1.3% de 2003 a 2013 (INEGI, 2014a), y en 2018 la disminución llegó a ser 4.8% respecto al año anterior (PEMEX, 2019). Según el INEGI (2013), “si se considera exclusivamente el monto de las reservas probadas de hidrocarburos, de acuerdo con los presentes niveles de explotación, se puede estimar una vida útil de alrededor de 10 años”. El INEGI (2019) calculó que para 2018 el costo por agotamiento de hidrocarburos representó el 0.3% del PIB.

Esto es, al producir agua embotellada en PET se están usando las últimas reservas de un material escaso para fabricar un producto con una vida útil de unas cuantas horas que rápidamente se desecha.

#### b) Agua

*“La crisis en la calidad y acceso al agua en México es un problema crónico”*  
Léo Heller, ONU

La Conferencia Internacional de Dublín sobre Agua y Medio Ambiente de 1992 (ICWE, 1992) marca una directriz mundial para incentivar el uso sostenible del agua, reconociendo que es un recurso finito y esencial, enfatiza la necesidad de una mejor gestión del agua, resalta el rol de la mujer para el buen aprovechamiento del agua y reconoce el valor económico del agua.

El agua fue reconocida oficialmente en la ONU en 2010 como un derecho humano<sup>9,10</sup> y establece que “el derecho de todos a disponer de agua suficiente, salubre, aceptable,

---

8 Gleick et al (2009) explican que, para agua embotellada que se transporta distancias cortas, los requerimientos de energía para producir las botellas plásticas dominan respecto a los requerimientos de energía de transporte; sin embargo, cuando el agua se transporta largas distancias, la energía de transporte puede igualar o superar a la energía de los procesos para fabricar los materiales; los costos de etiquetado, embotellado, refrigeración, son mucho menores que los costos de producción y transporte.

9 Ortega Castañeda (2016) argumenta que, puesto que el agua es un derecho humano, es un bien público y no exclusivo.

10 Aunque el agua es un derecho humano, es importante enfatizar que este derecho no incluye al agua embotellada, porque este producto vulnera varias características de un derecho humano, en particular la accesibilidad económica y la no discriminación (Ortega Castañeda, 2016).

accesible y asequible para uso personal y doméstico” (ONU, 2010; ONU, 2005). La ONU (2005) indica que “el agua debe tratarse como un bien social y cultural, y no fundamentalmente como un bien económico”. Por esto, se deben cumplir, en cualquier circunstancia, los siguientes factores (ONU, 2005):

- Disponibilidad: abasto continuo y suficiente para usos personales y domésticos<sup>11</sup>
- Calidad: salubre para uso personal y doméstico
- Accesibilidad: debe ser accesible físicamente (estar al alcance), económicamente accesible, acceso a la información y no debe ser discriminatorio.

Además, por tratarse de un derecho humano, el Estado tiene tres obligaciones (ONU, 2005):

- Respetar el ejercicio del derecho al agua
- Proteger el derecho al agua de particulares por parte de terceros (particulares, grupos, empresas, otras entidades) y eso puede incluir tener legislación para impedir el uso no equitativo e igualitario del agua,
- Facilitar, promover y garantizar a los particulares y a las comunidades a ejercer el derecho al agua.

En el artículo 4º de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos se establece que “Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines” (DOF, 2021); sin embargo este no está debidamente reglamentado por lo que “no se ha definido cuantos litros de agua comprende este derecho, el precio adecuado, la forma de abastecer en caso de que haya ausencia de red de agua, la calidad de ésta, y al mismo tiempo el correspondiente saneamiento de las aguas residuales” (Garmendia Cedillo, 2021).

Del total del agua existente en el planeta, únicamente 2.5% es agua dulce, y menos del 1% del agua dulce de la Tierra está disponible consumo humano (Carabias et al, 2005). Yacine Sanogho (2022) considera que los principales problemas relacionados con el agua dulce disponible son el cambio climático (por las sequías, inundaciones, desaparición de humedales y cambios en los patrones climáticos), contaminación ambiental (que afecta a lagos, ríos y acuíferos) y las corporaciones multinacionales (con sus enormes huellas ecológicas y apropiación de recursos naturales).

Aunque el agua se considera un recurso renovable a escala global, puede no serlo a escala local o regional. La ONU considera que el 40% de la población mundial vive en áreas con un

---

<sup>11</sup> Es importante hacer notar que el derecho humano al agua no contempla la distribución del agua, ni su uso para la agricultura, pastoreo o riego ni para la industria.

moderado o alto estrés hídrico y que para 2025 ese porcentaje aumentará hasta más del 60%; de hecho, en México la disponibilidad actual de agua per cápita es 64% menor que a mediados del siglo pasado (UN, 2021). Este estrés hídrico ha propiciado conflictos en varios sectores, incluyendo el agrícola, hidroeléctrico, minerías y potabilización de agua.

El agua proviene de dos fuentes: superficial (ríos, lagos) o subterránea (acuíferos) y es necesario distinguirlas, porque tienen diferentes características. Las aguas superficiales son la parte de las precipitaciones pluviales que escurren por corrientes y cuerpos de agua; las que se infiltran al subsuelo son las aguas subterráneas (CONAGUA, 2018).

Las aguas subterráneas son versátiles y pueden ser aprovechadas en cualquier época del año y en cualquier punto de la superficie del acuífero. Por lo contrario, aunque cierta parte del agua subterránea se renueva por la percolación de la lluvia o derretimiento de la nieve, la mayoría se ha acumulado en tiempo de dimensión geológica, que es mucho mayor que el tiempo de dimensión humana, por lo que se considera no renovable y por lo tanto su disponibilidad sí afecta a las futuras generaciones (Tietenberg, 2012). En el caso del agua superficial, los efectos intergeneracionales del consumo de agua son menos importantes que los del agua subterránea.

La CONAGUA (2018) considera como agua renovable el “la cantidad de agua máxima que es factible explotar anualmente en una región” de manera sustentable. Algunos acuíferos tienen períodos de renovación o recarga muy largos, de tal forma que se consideran no renovables (CONAGUA, 2018). Aunque la extracción de agua subterránea permite un amplio rango de actividades agrícolas, industriales y urbanas, el agua no extraída también provee servicios, como el soporte de los flujos naturales para el funcionamiento del ecosistema; también tiene valor de opción para usos futuros, incluyendo el amortiguamiento de variaciones de los flujos superficiales. Reubicar agua dedicada a la agricultura hacia usos no agrícolas particularmente hacia las zonas urbanas, es una fuente potencial de consecuencias adversas de equidad, sustentabilidad ambiental y bienestar de las poblaciones rurales (Elizondo, 2020).

En México, casi el 40% del agua concesionada para usos consuntivos proviene de aguas subterráneas, causando que 102 de los 653 acuíferos del país están sobreexplotados<sup>12</sup> (CONAGUA, 2018).

Desde el siglo XX, el consumo irracional de agua en la Zona Metropolitana de Ciudad de México ha originado cambios en los flujos superficiales y subterráneos, con el resultado de un descenso aproximado de 70m del nivel de agua subterráneo, a una velocidad de 1.3 m/año. Gran parte de los manantiales están secos, y los restantes “que aún fluyen, han sido captados sin considerar los impactos visibles o invisibles que esto causa, para oferta agua adicional a la industria y poblados periféricos asociados a la zona metropolitana de Ciudad de México” (Domínguez *et al*, 2007).

---

<sup>12</sup> Un acuífero se considera sobreexplotado cuando la extracción del agua supera su recarga (INEGI, 2014a)

Esta escasez se compensa importando agua de zonas más favorecidas en términos hídricos. Esto implica que existen zonas cuyo flujo de agua ha disminuido a causa del envío de agua a Ciudad de México, y tienen afectaciones en el abastecimiento público, calidad del agua, afectaciones a la salud de las poblaciones, disminución de la cantidad agua de riego, afectación en sistemas de acuacultura, degradación y pérdida de cobertura vegetal y bosques (Banco Mundial, 2015), alteraciones del ciclo hidrológico y los sistemas sociales dependientes (Ortega Castañeda, 2016).

Existe otro daño importante ocasionado por la excesiva extracción de agua: la subsidencia, que son asentamientos graduales o súbitos de la tierra y las consecuencias en las zonas urbanas son particularmente dañinos. Ciudad de México, se ha hundido más de 9 metros en 100 años<sup>13</sup> (Tietenberg, 2012). Los mayores hundimientos en dicha ciudad se ubican en las alcaldías Azcapotzalco, Iztapalapa, alrededores del Aeropuerto Internacional Benito Juárez, Xochimilco, y las cercanías de la zona del Gran Canal del Desagüe y del Río Churubusco, aunque también los hay en menor medida en Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Benito Juárez, Iztacalco y Venustiano Carranza (Perló Cohen *et al*, 2005). Hay indicios de que en Iztapalapa específicamente, ya se están perforando pozos de más de 2000 m de profundidad, para extraer agua fósil; sin embargo, este tipo de aguas pueden no ser aptas para consumo humano, debido a su contenido de sales, arsénico o material radioactivo (Reyez, 2017).

Además de las subsidencias, hay formación de cavernas, contaminación y salinización; desecación parcial o total de las lagunas y manantiales, abatimiento del nivel freático con la consecuente disminución de la disponibilidad de agua; altos costos de mantenimiento del sistema hidráulico, brotes de conflictos sociales causados por la mala planeación de la gestión afectación a la vegetación, agilización de la erosión y pérdida del suelo y alteración del microclima (Delgado, 2007; Soto-Montes de Oca, 2007; Hernández Chávez, 2017).

Otros impactos visibles de la alteración de los flujos hidrológicos son las inundaciones, que pueden causar daños tanto a los ecosistemas como a la misma infraestructura urbana, disminución del caudal y rendimiento de los pozos y el incremento constante en los costos de extracción, desaparición de manantiales y vegetación nativa, disminución de rentabilidad de actividades agrícolas, deterioro de la calidad de agua subterránea, destrucción del equipamiento urbano, incluyendo daños severos en algunas viviendas (Domínguez *et al*, 2007; DOF, 2016).

A pesar de la importancia de las consecuencias directas e indirectas de la extracción excesiva de agua subterránea, no se encontró ningún estudio o cuantificación económica del daño ocasionado al ecosistema y a las viviendas en Ciudad de México.

---

<sup>13</sup> Ciudad de México no es el único lugar donde existe subsidencia: en 1997 ya se habían estimado los hundimientos en ciudades como Las Vegas (1.8m), Houston (2.7m), Phoenix (5.5m)

El manejo inadecuado e irracional de los recursos hídricos es uno de los problemas ambientales más urgentes de México.

## 2. CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

### a) Contaminación del aire

La contaminación atmosférica es causada por emisiones de gases, partículas, aerosoles, polvos o cualquier tipo de sustancia que no haya estado originalmente, y que son descargadas al aire por los establecimientos y hogares como consecuencia de procesos de producción, consumo y acumulación; puede dañar la salud humana y de cualquier ser vivo, al medio ambiente y a los bienes materiales. Los contaminantes gaseosos más comunes son los óxidos de carbono, los óxidos de nitrógeno, los óxidos de azufre, hidrocarburos volátiles, clorofluorocarbonos; estos a su vez pueden reaccionar y formar otros como ácido sulfúrico o ácido nítrico.

La principal causa del incremento de la concentración de contaminantes atmosféricos es la combustión de hidrocarburos fósiles. Estos provienen de dos tipos de fuentes: fijas (fábricas, procesos industriales) o móviles (autos, camiones). Aunque hay gases comunes a las fuentes fijas y móviles, tienen dos diferencias principales por las que se deben analizar de forma particular: el transporte y las personas se encuentran en el mismo lugar al mismo tiempo, y además, es más difícil monitorear las emisiones de un automóvil porque éste no está en un punto fijo (Tietenberg *et al*, 2012).

Los contaminantes se pueden clasificar según su zona de influencia, que puede ser horizontal o vertical. La dimensión horizontal tiene que ver con el área sobre la cual se hace daño y puede ser local, regional o global y no son mutuamente excluyentes. La dimensión vertical describe daños a nivel subterráneo o atmosférico (Tietenberg *et al*, 2012).

Al ser transportadas en el aire, los contaminantes pueden someterse a una serie de reacciones químicas complejas, a causa de su interacción con otras sustancias o por la radiación solar. Por ejemplo, los óxidos de azufre y nitrógeno pueden disolverse en agua y formar ácido sulfúrico y nítrico, lo que se conoce como lluvia ácida; los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos, catalizados por la luz solar, pueden producir ozono; gases como dióxido de carbono, metano, óxidos de azufre, óxido nitroso, también llamados gases efecto invernadero, producen calentamiento de la atmósfera; los clorofluorocarbonos pueden dañar la capa de ozono de la estratosfera (Tietenberg *et al*, 2012; Sirikijpanichkul *et al*, 2006). En la Tabla 1 se encuentra un resumen de esta información.

Aunque en la atmósfera se encuentran de manera natural muchos de estos gases y el efecto invernadero es un fenómeno natural y es lo que ha permitido el desarrollo de la vida en el planeta, debido al aumento de la concentración de gases provenientes de actividades humanas la temperatura ambiental se está incrementando más allá de los límites normales. Este aumento de temperatura afecta a la salud de los ecosistemas y de las personas, y se refleja en el aumento de nivel del mar por el derretimiento del hielo polar, aumento de la

intensidad de las tormentas, inundaciones costeras, migración, muerte de especies sensibles, como corales, manglares y selvas (Tietenberg *et al*, 2012). En la Tabla 2 se muestra una compilación de esta información.

*Tabla 1 Resumen de causas y efectos de la contaminación atmosférica*

Contaminación del aire	Causa	Efectos
Lluvia ácida	Dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno	Daños en salud, vegetación, materiales y estructuras
Disminución de ozono de la estratósfera	clorofluorocarbonos	Daños en salud
Calentamiento global	Óxidos de carbono, metano, óxidos de nitrógeno, ozono, clorofluorocarbonos	Aumento de la temperatura mundial, fusión de capas polares, aumento de nivel del mar
Bruma química (smog)	Óxidos de nitrógeno, ozono, compuestos orgánicos volátiles	Daños en salud, vegetación, materiales

Fuente: Sirikijpanichkul *et al*, 2006

*Tabla 2 Efectos y escala de los principales gases de efecto invernadero*

Emisión	Efectos	Escala
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	Cambio climático	Global
Monóxido de carbono (CO)	Salud humana, cambio climático	Muy local
Clorofluorocarbono (CFC)	Disminución del ozono de la estratósfera	Global
Partículas finas (PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub> )	Salud humana, estética	Local, Regional
Metano (CH <sub>4</sub> )	Salud circulatoria, reproductiva y sistema nervioso	Local, regional
Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	Salud humana, precursor del ozono atmosférico, daños ecológicos	Local, regional
Ozono (O <sub>3</sub> )	Salud humana, daño a vegetación	Regional
Óxidos de azufre (SO <sub>x</sub> )	Salud del sistema respiratorio, lluvia ácida	Local, regional
Compuestos orgánicos volátiles (VOC)	Salud humana Precursor del ozono	Local regional

Fuente: Sirikijpanichkul *et al*, 2006

Aunque hay infinidad de compuestos que pueden contaminar la atmósfera, los más abundantes son: óxidos de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, compuestos orgánicos, metano, amoniaco, aldehídos, clorofluorocarbonos y partículas suspendidas. Cada uno tiene diferente reactividad; por convención, se toma como referencia la reactividad del CO<sub>2</sub> (Ver Tabla 3).

Es importante el estudio de las causas y consecuencias de la contaminación atmosférica porque la industria de plástico contribuye en cierta medida a este fenómeno.

De acuerdo al Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO, s.f. consultado el 14/3/22), a través de la “Calculadora de riesgos por contaminación atmosférica”, se calcula que en 2010, la mala calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México pudo causar hasta 2604 muertes atribuibles a la contaminación, con un estimado de costos que ascienden a 1,863 millones de pesos en pérdidas por muertes prematuras, egresos hospitalarios y consultas médicas; además de 33 mil millones de pesos por el costo de

oportunidad del tiempo invertido en los traslados (IMCO, 2016). El INEGI (2019) calcula que el costo de la contaminación ambiental en el país puede llegar a representar el 2.8% del PIB. Jaller et al (2015) estima que para México en 2010, los costos por impactos a la salud por causa de la contaminación del aire fueron del orden del 4% del PIB de nuestro país.

*Tabla 3 Reactividad y efectividad de algunos gases relativa al CO<sub>2</sub>*

Gas	Reactividad relativa al CO <sub>2</sub>	Efectividad relativa al CO <sub>2</sub> en 100 años	Tiempo de decaimiento <sup>14</sup>
Dióxido de carbono	1	1	120-500
Metano	70	15-30	7-14.5
Óxido de nitrógeno	210	320	120
Ozono	1800	3	0.01
CFC	4000	4000	50

*Fuente: Sirikijpanichkul et al, 2006*

Obtener información específica sobre “las emisiones que generan el transporte y la exportación de productos plásticos en el mercado mundial” es muy difícil; aunque las estimaciones indican que la industria mundial de plásticos llega a producir 400 millones de toneladas anuales de gases de efecto invernadero (PNUMA, 2021).

Según explican Jaller et al (2015), las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por el sector transporte han incrementado en un 87% en los últimos 20 años, siendo este sector el principal generador de partículas de carbono. De hecho, se calcula que cada unidad a diésel emite un promedio de 25.6 toneladas de CO<sub>2</sub> al año (TresPM.mx, 2021 consultado el 22/3/2022). Esto se debe a las emisiones máximas aceptadas por las normas oficiales mexicanas y a la tecnología usada por los camiones en circulación.

De los más de 6 millones de vehículos de la ZMVM, el 5.1% son vehículos de carga (SEDEMACDMX, 2021). De hecho, se reporta que el 81% de las emisiones totales de PM<sub>2.5</sub>, el 71% de las partículas PM<sub>10</sub> y el 91% del carbono negro son emitidas por los vehículos pesados que usan diésel, aunque estos solo contribuyen en el 15% al total del parque vehicular (IMCO, 2015). Por su parte, en el estudio publicado por Jaller et al (2015), explican que, aunque los grandes vehículos de carga que operan en Ciudad de México únicamente representan el 1% del total de la flotilla, son responsables del 40% y el 45% de las emisiones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, respectivamente; los vehículos de carga de mediano tamaño representan el 3% del total de la flotilla y generan el 20% de las partículas.

En el Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2018 (SEDEMACDMX, 2021) se resumen las estimaciones de emisiones contaminantes para el año 2018: las fuentes fijas generan el 19% del total de CO<sub>2</sub>eq, mientras que las fuentes móviles generan el 58.3%; el resto se debe a lo que llaman fuentes de área, que incluyen todas las fuentes no contabilizadas en las categorías anteriores. En total, se generaron en esta zona más de 75 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq durante el año 2018.

---

<sup>14</sup> Tiempo en que su concentración disminuye a la mitad.

En el trabajo de Jaller et al (2015) se hace una estimación de la distancia que recorren los vehículos mercantiles en Ciudad de México, de acuerdo al tamaño de la flotilla: los vehículos que pertenecen a compañías con flotillas menores a 100 unidades recorren distancias de 70 km por viaje; los que pertenecen a compañías con flotillas entre 100-500 unidades recorren, 56.6 km por viaje; y los que pertenecen a flotillas de más de 500 unidades recorren 48 km por viaje.

#### b) Contaminación del agua

*“Plastic rain is the new acid rain”*  
*[La lluvia de plástico es la nueva lluvia ácida]*  
*M. Simon, 2020*

En casi todos los ríos del mundo la calidad del agua se ha deteriorado por la contaminación. La calidad del agua depende de sus propiedades físicas (temperatura, olor, presencia de sólidos suspendidos), químicas (presencia de sustancias orgánicas e inorgánicas) y biológicas (presencia de algas, bacterias, virus) (Quentin Grafton *et al*, 2004). Se estima que en el mundo el 80% del agua residual industrial y municipal no se trata antes de ser devuelta al ambiente (UN, 2021).

Existen fuentes de contaminación del agua puntuales como los drenajes, descargas industriales o descargas de criaderos de animales, y las no puntuales como descargas o lixiviados provenientes de la agricultura (Tietenberg *et al*, 2012). Las sustancias contaminantes pueden ser naturales o sintéticas, tóxicas o no, acumulables o no acumulables y su efecto nocivo dependerá de su concentración y de su toxicidad. De hecho, hasta una alta cantidad de nutrientes puede ser perjudicial y causar eutrofización (Tietenberg *et al*, 2012). En el caso del presente estudio, la contaminación del agua se refiere a la causada por procesos industriales.

La contaminación de agua industrial se refiere al agua usada en los procesos de la industria que usan operaciones de enfriamiento o calentamiento, producción de vapor, disolvente, para operaciones de limpieza, y que se contaminan con sustancias químicas. Por lo tanto, su impacto está más relacionado con el tipo de descarga, que con la cantidad de agua utilizada. La industria del petróleo es responsable por la contaminación del agua causada por los diversos derrames de petróleo en el mar, o las fugas y descargas de hidrocarburos que suceden en tierra firme y contaminan los pozos de aguas subterráneas. Los residuos de sólidos generados por la industria del plástico que se vierten en cuerpos de agua se analizan específicamente en la sección de residuos sólidos.

El control de la contaminación del agua generalmente se realiza en plantas de tratamiento centralizadas, debido a la economía de escalas, y se monitorean factores como oxígeno disuelto, demanda química o biológica de oxígeno (Tietenberg *et al*, 2012). Sin embargo, en México no se someten a ningún tratamiento el 70% de las descargas industriales al agua, y son las que más incumplen las normas oficiales (Agua.org.mx, 2017, consultado el 23/3/2022). Se calcula que en México en 2018 se desecharon más de 21500 millones de

metros cúbicos de aguas residuales no tratadas<sup>15</sup>, cifra que representa el 0.2% del PIB (INEGI, 2019).

### c) Contaminación del suelo

El suelo está formado por una mezcla variable de minerales, materia orgánica, agua, y aire; y comprende varias capas además de la superficial. Sus propiedades físicas y químicas dependen de su composición

Las causas de contaminación del suelo incluyen a las actividades industriales, agrícolas, ganaderas y las relacionadas con los centros urbanos como el desarrollo de infraestructura y el depósito de residuos.

Las diferentes formas de contaminación o degradación del suelo pueden ir desde la contaminación con algún agente químico (petróleo, metales pesados, pesticidas), la erosión hídrica y eólica, degradación física del suelo (encostramiento, compactación, anegamiento) y degradación química (pérdida de fertilidad, salinización, acidificación), pérdida de carbono orgánico.

Las consecuencias de la contaminación del suelo son: contaminación indirecta de agua y aire, introducción de contaminantes en la cadena trófica, desertificación, pérdida de hábitat, pérdida de cosechas, pérdida de fauna.

En México más de 78 millones de hectáreas de terreno sufrieron degradación por las actividades antropogénicas en 2018<sup>16</sup>. Para revertir los daños ocasionados por los contaminantes y devolver la utilidad original al suelo y retornarlo a un estado productivo, se requerirían más de 119 mil millones de pesos, equivalentes al 0.5% del PIB del año 2018 (INEGI, 2019).

### d) Residuos sólidos

*“La contaminación por plásticos no tiene fronteras”  
(UNEP, 2021)*

Los residuos sólidos urbanos son aquellos provenientes del consumo doméstico, los provenientes de la limpieza de vías públicas y de establecimientos que generen residuos de las mismas características que los residuos domésticos.

Mientras que la cantidad de residuos que se generan dependen del crecimiento poblacional, consumo creciente y bajo reciclaje (INEEC-SEMARNAT, 2012), la composición

---

<sup>15</sup> Valor obtenido de las bases de datos del INEGI, específicamente “Esquema ampliado del SCNM con los balances de los activos y ajustes ambientales/ Balances de activos y ajustes por cambios en el agotamiento de los recursos naturales y por degradación del medio ambiente, en unidades físicas”.

<sup>16</sup> Valor obtenido de las bases de datos del INEGI, específicamente “Esquema ampliado del SCNM con los balances de los activos y ajustes ambientales/ Balances de activos y ajustes por cambios en el agotamiento de los recursos naturales y por degradación del medio ambiente, en unidades físicas”.

de los residuos generados depende de factores sociales (número de habitantes, población flotante), económicos (nivel de ingreso, actividades económicas), culturales (hábitos de consumo, celebraciones), ambientales y climáticos (SMAGCIUDAD DE MÉXICO, 2021). En general, el grado de contaminación que causan los residuos sólidos urbanos es función de la composición de los residuos, la capacidad de carga del ecosistema y el tamaño de la población. Los efectos pueden ser desde generación de emisiones contaminantes a la atmósfera, generación de lixiviados, impactos a la salud, incomodidad en las zonas cercanas a los sitios de manejo, pérdida de valor de los materiales que son desechados, costo por la gestión y por la disposición final de los residuos.

Habitualmente, los residuos sólidos urbanos tienen una parte de residuos orgánicos (residuos de alimentos, de jardines, de plantas y animales) y otra parte de residuos inorgánicos, que pueden incluir cartón, papel, plástico rígido y de película, cartón encerado, fibras sintéticas, uncel, hule, latas, vidrio, poliuretano, entre otros (INEEC-SEMARNAT, 2012). En esta última categoría, residuos inorgánicos, se encuentran los residuos de PET.

Existen algunas estimaciones sobre la generación mundial de residuos plásticos: Geyer et al (2017) han estimado que la generación de residuos plásticos en 2010 fue de 274 millones de toneladas, y los autores estimaron que para 2015 todos los desechos plásticos generados a lo largo de la historia de la producción industrial, habrán alcanzado las 6300Mt, de las cuales el 79% se ha desechado, 12% ha sido incinerado y el 9% ha sido reciclado y de este porcentaje únicamente el 10% se ha reciclado más de una vez. De seguir esa tendencia para 2050 se habrán reciclado 9000 MT, 12000 MT se habrán incinerado y 12000 MT se habrán enviado a rellenos sanitarios o estarán dispersos en el ambiente.

Por su parte, el World Economic Forum *et al* (2016) estima que el 32% de los empaques plásticos desechados a escala mundial no son recolectados debido a su tamaño, alto grado de dispersión y bajo valor residual; y la mayoría de los empaque de plástico se desechan el mismo año en que son producidos (Geyer et al, 2017).

Debido a la importancia del problema, en tiempos recientes se han enfocado esfuerzos para estimar la cantidad de plásticos acumulados en el océano; las cifras calculadas varían según el método que se use para coleccionar las muestras y de la zona de muestreo. Rivas (2019) ha estimado que la cantidad que llega al mar son 12.7 millones de toneladas al año. En World Economic Forum *et al* (2016) se estima que, mundialmente, cada año llegan a los océanos por lo menos 8 millones de toneladas de plástico; esto implica que a lo largo del tiempo se pueden haber acumulado hasta 150 millones de toneladas en los mares. Por su parte, la UNEP (2017) estima que cada año llegan al océano entre 4.8 millones y 12.7 millones de toneladas de residuos plásticos. Geyer *et al* (2017) estimaron que, únicamente en 2010, llegaron al mar entre 4-12 millones de toneladas de residuos plásticos.

En “The New Plastic Economy. Rethinking the future of plastics” (World Economic Forum *et al*, 2016) se estima que llegan al océano anualmente, por lo menos, 8 millones de toneladas de plástico, de las cuales los empaques conforman la mayoría. El pronóstico es que ese número se duplique para 2030 y se multiplique por 4 para 2050. The Pew Charitable Trust

et al (2020) prevén que para 2040 esa cifra puede fluctuar entre los 23 y 37 millones de toneladas por año, un promedio de 29 toneladas por año.

Sin embargo, estos valores pueden estar sub-estimados: el estudio de Brandon (2019), con el que se mejoró el método de cuantificación de los microplásticos, estima que la concentración de partículas de plásticos en la superficie marina es entre 5-7 órdenes de magnitud más que lo previamente estimado en otros estudios.

La identificación y cuantificación del daño provocado por los residuos plásticos puede hacerse de acuerdo a dónde está el residuo (disposición controlada o no controlada) y del tamaño de partícula del residuo (macro, micro o nano plástico).

De hecho, las botellas de plástico de bebidas y sus tapas de plástico<sup>17</sup> son los objetos que con más frecuencia se encuentran en el mar y costa de EUA (16.7 y 12%, respectivamente), después de las envolturas de comida (18.6%) (5 Gyres, 2017). Eriksen *et al* (2014) estiman que existen más de 5 trillones de piezas de plástico flotando en el océano, que en total pueden llegar a pesar 250000 toneladas.

Los residuos de PET depositados correctamente en rellenos sanitarios estarán contenidos en él sin provocar afectaciones ambientales, ya que no generan riesgos de lixiviación o de contaminación de aguas y además el material es estable, inerte y no degradable (PET Resin Association, 2015). Precisamente por estas características ocuparán espacio del relleno sanitario durante su largo tiempo de vida, causando costos de mantenimiento del mismo, más el costo inicial del transporte del residuo.

Por otro lado, los residuos de PET abandonados de manera informal pueden degradar ecosistemas como bosques, selvas y flujos de agua, además de tener impactos sobre la vida, cadena alimenticia, la salud de los seres vivos y de los sistemas sociales y económicos, además de ocasionar la contaminación de cuerpos de agua, bloqueo de coladeras y drenajes y consecuentes inundaciones urbanas en época de lluvias, acumulación y bloqueo de corrientes de agua, deterioro de lugares de recreación, mala imagen, proliferación de fauna nociva, contaminación de cuerpos de agua o de consumo (World Economic Forum *et al*, 2016, Mora-Reyes, 2004). Cuando los residuos plásticos llegan a los mares y océanos, persisten en el tiempo, ocupan enormes áreas y además, se mueven con las corrientes de agua; una vez en el océano, es prácticamente imposible recolectarlos ya que con el tiempo se fragmentan hasta formar microplásticos; de esa forma actúan como vectores que facilitan la entrada de químicos tóxicos en la cadena alimenticia (UNEP, 2014).

---

<sup>17</sup> Las tapas de las botellas flotan en el agua y llegan a costas y playas remotas. Los animales marinos y aves a menudo las confunden por alimento y esto causa perforación del estómago o falsa sensación de saciedad, resultando en malnutrición y enfermedad (5 Gyres, 2017).

Los plásticos de tamaño macroscópico pueden romperse en pedazos cada vez más pequeños hasta ser considerados microplásticos<sup>18</sup>. Estos, al igual que los plásticos de mayor tamaño, se encuentran dispersos en todo el mundo, incluyendo el océano y los sedimentos del mar profundo, por lo que es prácticamente imposible colectarlos; además, por su reducido tamaño, alcanzan lugares a los que los macroplásticos no llegan.

La luz ultravioleta es uno de los principales factores que influyen en la degradación de los plásticos, aunque también depende del tipo de polímero, de la temperatura ambiental, de la presencia de oxidantes y de los aditivos que se la hayan añadido al plástico. De hecho, se ha visto que la degradación de los plásticos es mucho menor si se encuentran dentro del agua y/o hundidos, por la menor cantidad de rayos UV que llega.

Aunque, en términos generales, las características fisicoquímicas del PET lo hacen no biodegradable en el ambiente recientemente se han encontrado evidencias de migración de oligómeros del PET hacia alimentos y bebidas así como liberación de ciertos aditivos al ambiente<sup>19</sup> (Hahladakis et al, 2018); por otra parte los microplásticos pueden absorber químicos orgánicos tóxicos (Simon *et al*, 2017), y también pueden actuar como de vector que facilita la sorción<sup>20</sup> de contaminantes en el ambiente marino y en las plantas (5 Gyres, 2017).

Otro de los problema de los microplásticos es que son fácilmente ingeridos por los animales junto con aditivos y otros químicos, por lo que entran en la cadena alimenticia y afectan el desarrollo y la reproducción de especies (Ryan, 2015). Esto es importante, porque una vez que los microplásticos entran a un ecosistema, pueden proliferar a través de las cadenas tróficas (Petersen, K, 2020). Existe evidencia de partículas de plástico en el agua de la lluvia (Simon, 2020); también se han encontrado partículas de plástico en 83% de las muestras de agua de la llave alrededor del mundo; además ya se han encontrado microplásticos dentro de vegetales y frutas, animales y hasta dentro de tejidos humanos (5 Gyres, 2017); recientemente se ha comprobado la presencia de PET en sangre (Leslie et al, 2022).

Aunque las investigaciones de los efectos ambientales causadas por los residuos de microplásticos se han acelerado, aun se sabe muy poco de los impactos hacia los ecosistemas y a la salud humana (Geyer *et al*, 2017); más recientemente Harkin (2020) empieza a hablar de más efectos correlacionados con los microplásticos incluyendo cáncer, defectos de nacimiento, pubertad precoz, desordenes neuronales, malformación genital, infertilidad, tumores dependientes de las hormonas, desordenes metabólicos, entre otros. También se habla que los plásticos pueden provocar cambios fisicoquímicos en los suelos a

---

<sup>18</sup> Aunque existe controversia al respecto, se consideran microplásticos si éstos son menores a 5mm (Ryan, 2015).

<sup>19</sup> El Tinuvin P es un aditivo estabilizante del PET para prevenir a degradación por luz. También se le pueden añadir plastificantes como el dipentilftalato, di-(2-etilhexil)adipato, di-actiladipato, dietilftalato, diisobutilftalato, dibutilftalato (Hahladakis et al, 2018)

<sup>20</sup> El fenómeno de sorción incluye a la absorción, cuyos enlaces energéticos son débiles, y a la adsorción, cuyos enlaces energéticos son fuertes.

nivel macro y micromolecular, y también pueden alterar y perjudicar la microbiota y pequeñas especies (5 Gyres, 2017). El PNUMA (2021) explica que aún es poco lo que se conoce sobre la degradación de los plásticos y la liberación de aditivos de los plásticos en diferentes contextos ambientales, además de la asimilación de micro y macroplásticos en la cadena trófica.

Los cuestionamientos acerca de la problemática que causan microplásticos en el suelo empezaron en 2016, y es apenas hasta 2019 y 2020 cuando han empezado a publicarse artículos de investigación científica<sup>21</sup>. Existen estimados que sugieren que se acumulan en suelo entre 107,000 y 730,000 toneladas anuales de microplásticos, esto es, 15-300% más que lo que se acumula en los océanos. Pueden provenir de los lodos de aguas tratadas, plásticos usados en las granjas, fertilizantes de acción retardada y cubiertas de semillas (Petersen, K, 2020).

Recientemente se ha ampliado la clasificación de las partículas de residuos plásticos, para incluir a los nano-plásticos (Stapleton, 2021; ter Halle et al, 2021), que son partículas de plástico de menos de 1nm, esto es 1E-9m. Esto es debido a que existen diferencias en la interacción con el ambiente y comportamiento fisicoquímico entre las nano-partículas y las micro-partículas: al tener una gran área superficial, presentan comportamientos como la heteroagregación y/o formación de clústers o racimos, se modifica la reactividad, toxicidad, mecanismos de transporte y riesgo para los organismos y el ambiente (Ter Halle, 2021), además de que los mecanismos de reacción con partículas disueltas son más complejos.

## C. ECONOMÍA

En esta sección se hace una breve introducción a las herramientas que se usan en economía ambiental para cuantificar los costos ambientales derivados de las actividades económicas, con el fin de clarificar las ventajas, desventajas y limitaciones al usar esta herramienta de la ciencia económica. Inicialmente se da una breve introducción de la visión del medio ambiente por la economía neoclásica, siguiendo con la economía ambiental y la definición de externalidades, valor económico de los recursos naturales, costos ambientales, los

---

<sup>21</sup> Para mayor referencia consultar:

Nizzatto *et al* (2016) Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? *Environ. Sci. Technol.* 2016, 50, 10777–10779

Bolan, N; Kirkham, M; Halsband, C; Nugegoda, D; Ok, YS (2020) Particulate Plastics in Terrestrial and Aquatic Environments (2020)

Sun, X., Yuan, X., Jia, Y. *et al.* (2020) Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Nat. Nanotechnol.*

Yu, M; van der Ploeg, M. *et al.* (2019) Leaching of microplastics by preferential flow in earthworm (*Lumbricus terrestris*) burrows. *Env. Chem* 16, 31-40.

Li, L., Luo, Y., Li, R. *et al.* (2020) Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode. *Nat Sustain.* 3, p. 929-937.

métodos para hacer valoraciones ambientales, y finalmente, una breve crítica a la valoración económica de recursos naturales.

En la economía neoclásica, el ambiente es visto como un proveedor de materia prima y energía, que son transformadas en productos para el consumidor y residuos que regresan a la naturaleza (Tietenberg *et al*, 2012). Considera como bienes económicos aquellos que son escasos, tienen demanda y, al estar incorporados al mercado, tienen un precio. En esta visión ortodoxa de la economía, la producción, distribución y consumo de productos tienen como meta el crecimiento continuo y sin fin del sistema económico. La mejoría en el nivel de vida se consigue a través del uso intensivo de materias primas y recursos energéticos, tiene como consecuencia el agotamiento de recursos naturales y la generación de contaminación hacia el ambiente.

Al reconocer el costo de los impactos ambientales debidos a las actividades económicas, se puede lograr una visión más acertada sobre las consecuencias de los procesos económicos, en este caso, de la industria del agua embotellada.

La economía ambiental analiza tanto los efectos de la economía en el ambiente como de los efectos del ambiente en la economía. En otras palabras, se ocupa del equilibrio entre la calidad ambiental y los intereses económicos y sociales. Esto es, la economía ambiental puede medir los costos y beneficios de los procesos económicos en la sociedad y en el medio ambiente.

Esta área de la ciencia económica, derivada de la economía neoclásica, puede ayudar entre otras cosas<sup>22</sup> a la solución de los problemas ambientales y de salud causados por las actividades como la industria, agricultura, procesos de transformación o el transporte, cuyos efectos no están contabilizados en el sistema económico tradicional.

Respecto a los problemas ambientales, la economía ambiental considera que éstos surgen por “fallas de mercado”, es decir, situaciones en las que el mercado no hace una asignación óptima de recursos. Dichas fallas de mercado son: competencia imperfecta<sup>23</sup>, información imperfecta<sup>24</sup> o asimétrica, externalidades, bienes públicos<sup>25</sup> (Pérez Espejo *et al*, 2010; Cristeche *et al*, 2008).

---

22 También se usa para la solución de problemas de asignación, diseño de políticas públicas, valoración económica de servicios ecosistémicos, a resolver problemas distributivos.

23 Sucede cuando el productor tiene suficiente poder como para afectar el precio, como en el caso del monopolio, oligopolio y monopsonio.

24 Esto es, existencia de información privilegiada por algún agente del mercado, y tiene como consecuencia que los recursos se asignan ineficiente o erróneamente y se da un desperdicio o valor perdido del recurso (Téllez Maldonado, 2012; Nieto Ruiz, 2014).

25 Los bienes públicos son aquellos que “no son excluibles”, esto es, están disponibles para todas las personas; y que no generan rivalidad, es decir, el uso por una persona no afecta el uso de las demás personas. Por lo tanto, los bienes públicos no pueden racionarse y se puede disponer libremente de ellos (Monroy Saldívar, 2006).

La Comisión Europea (European Commission, 2000) define a las externalidades como costos y beneficios que surgen cuando las actividades económicas o sociales de un grupo de personas tienen impacto sobre otro grupo de personas, y el generador de los efectos no paga o no recibe beneficio por ellos; de ser un problema, debe existir un reclamo explícito de la sociedad (Pérez Espejo *et al*, 2010). Las externalidades pueden ser locales, transfronterizas o globales (European Commission, 2000).

Al no incluir las externalidades negativas en el precio de los productos, éste es menor que si se incluyera dicho costo de tal forma que los mercados y recursos no se distribuyen de forma eficiente y se provocan una incorrecta fijación del precio del producto y distorsiones en el uso de recursos naturales evidenciada en exceso de producción y de costos sociales y ambientales (Aragón Rodríguez, 2008; Pindyck, 2009; Delacámara, 2008).

Las externalidades positivas pueden considerarse la educación, la salud, la investigación pues sus beneficios se extienden más allá del receptor directo. Como ejemplo de externalidades negativas están las emisiones de gases de efecto invernadero, contaminación de agua, aire y suelo, contaminación visual y auditiva; estas externalidades, a su vez, pueden causar efectos a la salud, cambio climático, daños a las cosechas, daños en las construcciones, entre muchas más.

A pesar de los efectos dañinos parecen ser muy evidentes, existen razones por las que las externalidades negativas pueden no ser percibidas inmediatamente: la capacidad de asimilación de contaminantes por el aire, agua y tierra, debajo de la cual el impacto no es perceptible; porque los afectados no perciben el daño; porque se subestima el daño por falta de información científica; por la resiliencia de la población de adaptarse a los cambios, aun cuando éstos son negativos (Delacámara, 2008). Es importante recordar que los daños ambientales son función del tipo de receptor del daño, de la magnitud del daño y de la duración de la exposición a contaminantes específicos (Eshet *et al*, 2006).

La consecuencia de una externalidad negativa hacia el ambiente se considera un **costo ambiental**; costo en el sentido de que es un daño hacia el ambiente y/o hacia las futuras generaciones (Matteson *et al*, 2022 consultado el 23/2/2022); por lo tanto, un análisis de las externalidades ambientales negativas implica una cuantificación los daños ambientales en términos físicos y que después una valoración en términos monetarios.

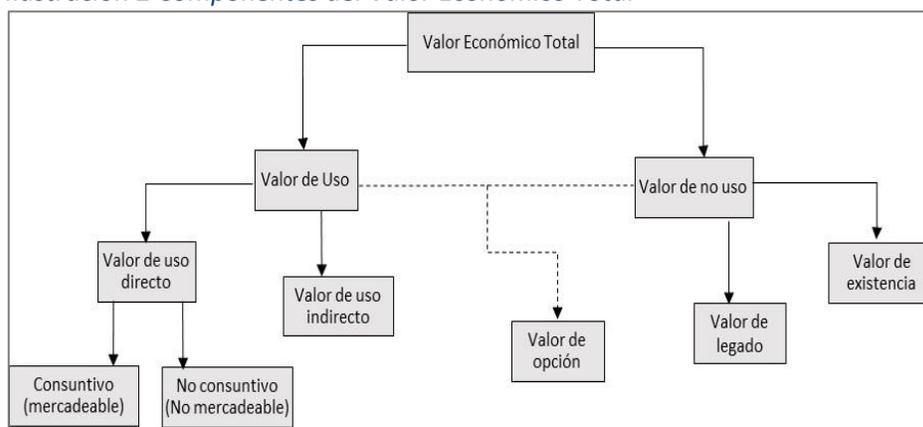
La valoración es el proceso por el cual una persona o una entidad asignan un valor a algo (UN, 2021). Para Freeman *et al* (2014), cuando se trata de ecosistemas y servicios ambientales el término valor puede diferir según quién lo defina: los ecologistas hablan del valor intrínseco de la vida, y los economistas hablan de un equivalente económico justo o valor instrumental. El concepto de valor económico total se basa en la economía neoclásica que se basa en el supuesto de que las actividades económicas aumentan el bienestar de los individuos y de la sociedad; el bienestar no depende únicamente del consumo de bienes públicos y privados, sino de disponer de recursos naturales y de procesos ecosistémicos en cantidad y calidad (Rebolledo López, 2011).

Cristeche *et al* (2008) explica que “los bienes y servicios ambientales pueden poseer un valor desigual para diversos individuos y grupos de personas; la agregación de esos distintos valores marginales por debajo de algún tipo de umbral mínimo es una aproximación al Valor Económico Total”. Esto es, el valor económico total engloba a todos los beneficios que puede proveer el ambiente o algún servicio ecosistémico.

El valor económico total atribuido a los recursos naturales puede descomponen en dos: valor de uso y valor de no uso (Tietenberg, 2012; Nieto Ruiz, 2014; Cristeche *et al*, 2008; UN, 2021) (Ver Ilustración 2). Una estimación del valor económico total debería incluir todos estos valores.

- a) Valor de uso: Se refiere al valor de los servicios ambientales o ecosistémicos empleados para consumo y producción. Pueden ser:
- Directo: se refiere a bienes que sí tienen precio de mercado (consuntivos), como la vivienda, bienes agrícolas, de caza o pesca; y los que no tienen precio en el mercado (no consuntivos), como es un espacio natural para la recreación o la investigación.
  - Indirecto: asigna valor económico a funciones ecológicas o los servicios ambientales que benefician indirectamente a las personas como secuestro de carbono, purificación de aire, filtración de agua, regulación hidráulica, protección del suelo o la biodiversidad.
- b) Valor de no-uso: También llamado intrínseco, corresponde a la sola existencia de los recursos naturales y a su función en los ecosistemas, es independiente de la sociedad. Pueden ser:
- Opción: se usa para asignar un valor en el presente a un bien que se cree pueda ser usado en el futuro (se puede considerar también valor de uso)
  - Legado: preservación de recursos naturales y servicios ecosistémicos para las futuras generaciones. Por lo general no se valora monetariamente.
  - Existencia: el derecho de recurso natural o servicio ecosistémico de ser preservado por su mero valor de existencia; por lo general no se valora monetariamente.

*Ilustración 2 Componentes del Valor Económico Total*



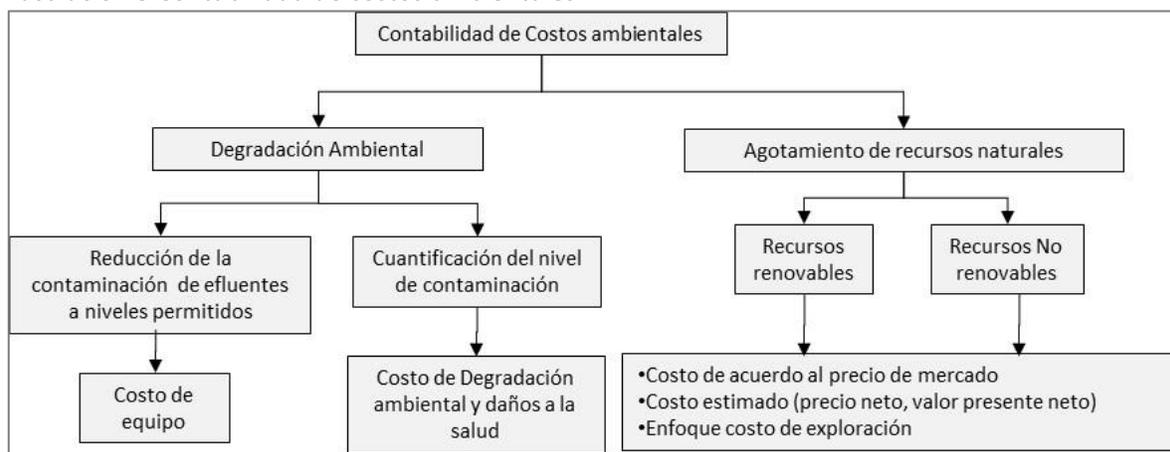
Fuente: Tietenberg, 2012; Nieto Ruiz, 2014; Cristeche *et al*, 2008; UN, 2021

Para poder hacer una valoración económica de los daños ambientales es necesario que todos los bienes y servicios ambientales evaluados tengan un precio asignado por el mercado. Sin embargo, esto no sucede en la mayoría de los bienes y servicios ambientales; por lo tanto se tiene que recurrir a otros métodos para su valoración (European Commission, 2000).

La valoración de costos o daños se puede estudiar desde dos perspectivas: desde el punto de vista del costo del daño ecológico en sí; y desde el punto de vista del método que se va a usar para realizar la valoración.

Cuando se habla desde el punto de vista del daño o costo ecológico también se puede hacer una **contabilidad de costos ambientales**, que se divide generalmente en: el daño o costo de la degradación ambiental causada por emisiones, y el daño o costo asociados al uso de recursos y su agotamiento (Pirmana et al, 2021) (Ver Ilustración 3).

*Ilustración 3 Contabilidad de costos ambientales*



Fuente: Pirmana et al, 2021

- a) Degradación ambiental: mide la disminución de la calidad ambiental causada por las actividades. Se puede hacer de dos formas:
  - Método basado en la cuantificación del daño o nivel de contaminación: Calcula los costos de la contaminación debida a la descarga de contaminantes que causan deterioro ambiental y daños a la salud.
  - Método basado en reducción de contaminantes de efluentes a niveles permitidos: calcula el costo requerido para reducir la descarga de contaminantes de los procesos de producción o consumo, utilizando la mejor tecnología disponible.
- b) Agotamiento de recursos naturales. Este grupo puede sub-dividirse en: recursos renovables (son auto-regenerativos; a pesar de ello sus existencias pueden colapsar por la sobre-explotación) y recursos no renovables (no pueden ser regenerados; únicamente al extraerlos se obtiene provecho de ellos). Los métodos para medir monetariamente el costo del agotamiento son:
  - Enfoque de precio de mercado: parte del supuesto que se puede comerciar con los bienes ambientales. Es fácil obtener información de precios y costos de aquellos que

sí están en el mercado, pero difícil obtener información de aquellos que no están en el mercado. Debido a las imperfecciones del mercado, pueden no reflejar el verdadero valor económico de los bienes y servicios ambientales.

- Enfoque de ingreso: Es un método indirecto, cuando no existe un mercado. Existen posibles métodos para usar este enfoque, incluyendo el método del precio neto, y el precio del valor presente neto, entre otros.
- Enfoque de costo de exploración: Es una medida para valorar recursos minerales; se base en los costos de exploración.

La valoración económica de acuerdo a los **métodos** que se usan engloban tres categorías principales que son: las preferencias reveladas, preferencias declaradas y la valoración de expertos (Eshet *et al*, 2006; Cristeche *et al*, 2008; ONU, 2012) (Ver Ilustración 4). Cada una de estos métodos puede ser usado para encontrar estimaciones de los diferentes tipos de valor.

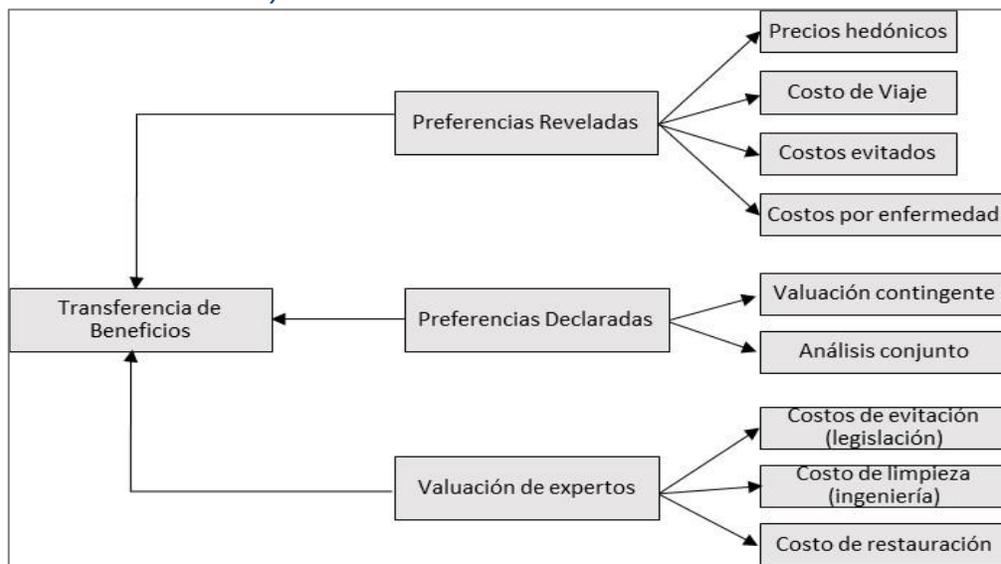
- a) Preferencias reveladas: son métodos indirectos con los que se infieren las preferencias individuales y los costos implícitos se obtienen por observaciones reales del mercado.
  - Precios hedónicos: usa procedimientos estadísticos para medir la afectación de un problema ambiental a los precios de mercado de algunos bienes como vivienda y trabajo
  - Costo de viaje: estima el costo y beneficios para acceder a un área recreativa, o los costos por la creación, cambio o eliminación de un sitio recreativo.
  - Costos evitados (Averting behavior method): se refiere a los costos de equipo, acciones o tratamiento que evitan o disminuyen la contaminación, degradación ambiental, daños a la salud, productividad ambiental.
  - Costos por enfermedad: estima los costos públicos y privados por los días no trabajados debidos a enfermedades debidas a la contaminación.
  - Función de producción de salud: mide la salud como función de diversos factores, incluyendo el ambiental.
- b) Preferencias declaradas: son métodos directos que permiten la valoración económica de bienes intangibles, de acuerdo a preferencias individuales. Se utilizan encuestas para encontrar la disposición a aceptar un perjuicio o disposición a pagar por un bien.
  - Valoración contingente<sup>26</sup>: determina la disposición a pagar por una mejora ambiental o preservación de un bien, o la disposición a tolerar un daño a cambio de un beneficio económico.
  - Análisis conjunto (Conjoint analysis): también conocido como Choice Modeling, esta técnica se basa en la premisa de que cualquier bien puede ser descrito en términos de sus atributos, y se mide el efecto del cambio de dichos atributos en la disposición a pagar por dicho bien.

---

<sup>26</sup> Contingente = que puede suceder

- c) Valoración de expertos: se basa en la experiencia y juicio de profesionales de áreas como la ingeniería, para estimar costos de reparación, restauración, o reemplazo de un bien dañado.
- Método de evitación: infiere el valor que la sociedad le atribuye a la contaminación a partir del costo de implementar leyes y regulaciones para evitar o disminuir la contaminación ambiental.
  - Método de costo de limpieza: costo de las tecnologías necesarias y suficientes para prevenir la contaminación; asume que el costo de rehabilitación del bien dañado hasta lograr sus condiciones originales es el proxy mínimo del valor económico del daño hecho.
  - Método de costo de reemplazo o restauración: mide el costo de restaurar o regresar un bien o un ecosistema dañado a sus condiciones originales o hasta un límite aceptable; implica que el reemplazo es factible.
  - Método de ajuste estructural: supone una reestructuración de la economía (patrones de producción y consumo), reduciendo o eliminando por completo actividades contaminantes.

Ilustración 4 Métodos y técnicas de valoración monetaria



Fuente: Eschet et al, 2006

Puesto que los estudios de valuación son caros y complicados de llevar a cabo existe una práctica aceptada por investigadores y tomadores de decisiones que permite, en ausencia de información empírica específica para un estudio, usar como fuente de información otros estudios previos (estudios primarios) y aplicar los valores ajustados por técnicas econométricas. A esto se le conoce como Transferencia de Beneficios. Se debe considerar que esto añade incertidumbre a los valores estimados (Eschet et al, 2006).

Los estudios de valoración económica están basados en percepciones particulares de personas o grupos acerca del valor de un servicio ecosistémico en un tiempo y lugar en

específico y está influenciada por los objetivos inicialmente buscados o por el mismo planteamiento del problema.

En muchas ocasiones, existen dificultades para la realización de la valoración económica como la poca o nula información, el considerar a los recursos naturales como bienes intangibles, las incertidumbres inherentes al problema, y la dificultad de evaluar todos y cada uno de los daños ambientales a lo largo del ciclo de vida completo y en todas las rutas de los contaminantes en los ecosistemas, así como la evaluación de sus efectos tanto en el presente como en el futuro. Quentin Grafton *et al* (2004) lo explica como fallas en la contabilidad de costos y beneficios, o bien, una contabilidad de costos incompleta o inapropiada. Además de todo lo anterior, la valoración económica no garantiza la protección del ecosistema. Por esto, los valores obtenidos deben tomarse con prudencia, pues están sujetos a errores e incertidumbre.

Además, existe el riesgo de que al usar valores monetarios para medir los costos ambientales, éstos se usen forma automática sin entender la forma en que se determinan, las preferencias que representan y los contextos en que deben usarse. También se tienen otros problemas como el implicar que los diferentes recursos naturales son intercambiables, el problema de la comodificación de la vida y sub-valoración de la naturaleza, aún de forma no intencional, y las dificultades éticas de asignar valores económicos a bienes que aseguran la vida del planeta (Steen, 2008; UN, 2021).

La ventaja de la valoración económica de recursos naturales es que los procedimientos cualitativos son más transparentes y reproducibles, se pueden comparar costos con beneficios en una misma unidad de métrica, se mejora la información de cada actividad económica y se reduce la discrecionalidad; se pueden calcular los costos de un daño y los beneficios obtenidos al reducir dichos daños.

Aunque existe controversia sobre la valoración económica, al medir y valorar los impactos ambientales en términos económicos se visibiliza la magnitud del costo social de los impactos ambientales, permite comparar la significancia de los diferentes impactos e integrar balances ambientales a la contabilidad financiera, así como cuantificar la importancia del factor ambiente en los procesos (UNEP, 2014). En otras palabras, cuando los efectos de un proyecto se conocen y se evalúan abarcando todos los bienes y servicios incluyendo los ambientales, se pueden conocer y comparar las ventajas y desventajas de cada proyecto analizado, inclusive en términos económicos (European Commission, 2000).

Cuando el objetivo de la valoración es la concientización o aumentar el interés acerca de un problema ambiental, se puede optar por métodos de poca precisión; para hacer planeación urbana y regional se pueden usar métodos de mala o media precisión; para el cálculo de pagos de servicios ecosistémicos se requieren técnicas con precisión media o alta (UN, 2021). Además, aun cuando los impactos no se cuantifiquen, estos deben ser mencionados ya que la mera reflexión sobre las consecuencias hacia el ambiente es valiosa y es mejor una descripción cualitativa que no tener información (European Commission, 2000; Delacámara, 2008; Nieto Ruiz, 2014).

La mejor justificación de la valoración económica del medio ambiente o de los daños al medio ambiente es que, de lo contrario, ésta se asume un valor nulo dentro de los análisis de factibilidad económica, y eso altera desfavorablemente la percepción del problema y el análisis de opciones. Sin embargo, el valor económico estimado de los daños ambientales debe ser interpretado con mucho cuidado y sólo como un indicador comparativo (Azapagic, 2011), ya que no todos los valores pueden o deben ser definidos o restringidos monetariamente (UN, 2021).

## II. METODOLOGÍA

---

En este capítulo se realiza la búsqueda de información, manejo de datos y cálculos necesarios para llegar a los resultados esperados. Los pasos se resumen en Ilustración 5 y posteriormente se desarrollan.

*Ilustración 5 Esquema metodológico*

### **A. Identificación y cuantificación de daños ambientales**

- Búsqueda de información de estudios de Análisis de Ciclo de Vida
- Identificación de las categorías de impacto ambiental relevantes
- Definición de la unidad funcional elegida
- Cálculo de impactos ambientales para la unidad funcional elegida

### **B. Cálculos preliminares de balances de materia**

- Petróleo
- Agua
- Residuos sólidos
- Distribución de impactos entre empaque y contenido
- Contaminación atmosférica

### **C. Cálculo de costo ambiental unitario**

- Búsqueda en literatura y selección de fuentes de acuerdo a las categorías de impacto ambiental seleccionadas
- Actualización de costos a valores constantes
- Cálculo del costo ambiental por unidad funcional para cada categoría de impacto

### **D. Resultados**

- Costo ambiental total de la unidad funcional
- Comparación de costo ambiental vs. precio promedio de venta
- Distribución del costo ambiental entre empaque (PET) y contenido (agua)
- Costo ambiental total de la industria de agua embotellada en Ciudad de México

El primer paso es definir las fuentes de información para cuantificar los daños ambientales. Para ello se usa información especializada de ocho estudios de Ciclo de Vida disponibles, con los que se identifican y cuantifican las categorías de impacto ambiental que surgen durante el ciclo de vida del agua embotellada; también se define la unidad funcional, esto

es, la unidad de referencia que se usará, y se realizan los cambios necesarios para tener la información de los ocho estudios en la misma unidad funcional.

Como segundo paso, se realizan algunos cálculos y balances que se van a requerir posteriormente. Se decidió ponerlos en una sección propia, para facilitar lectura.

Para definir la importancia relativa de las categorías de impacto elegidas en el primer paso, existen varias posibilidades como: usar una unidad común (masa, energía, área), factores de equivalencia de un efecto específico (calentamiento global o toxicidad), factores de ponderación determinados por un grupo de expertos, o factores monetarios, en la cual los impactos ambientales se evalúan monetariamente (UNEP, 2010). Esta última opción es la que se utiliza en este trabajo, y para ello se utiliza información de costos ambientales.

Por lo tanto, el tercer paso de este capítulo, se busca información sobre los costos ambientales en literatura especializada. Esta técnica o procedimiento se denomina Transferencia de Beneficios<sup>27</sup> o Transferencia de Resultados que consiste en usar la información y resultados de algunos estudios en otra investigación; generalmente se usa “para estimar valores económicos de servicios del ecosistema mediante la transferencia de información disponible en estudios” (Cristeche et al, 2008). Este procedimiento se hace sobre todo cuando no existen datos propios y no se tiene ni tiempo ni dinero para obtenerlos por medio de una investigación propia. La ventaja es que es barato y rápido, y la desventaja es que no es específico para las circunstancias particulares de cada problema, y por lo tanto, los resultados tienen cierta imprecisión.

Los costos ambientales se actualizan al año base escogido, 2013. Posteriormente se calcula el costo ambiental de cada categoría de impacto por unidad funcional.

## A. IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL DAÑO AMBIENTAL

Para la identificación y cuantificación del daño ambiental de la industria del agua embotellada se elige la metodología de Análisis de Ciclo de Vida basado en proceso. Con ello se puede realizar una evaluación precisa para las diferentes etapas del ciclo de vida e incluir varias categorías de impacto específicamente para Ciudad de México.

Por muchos años, los esfuerzos por reducir daños o impactos ambientales se han restringido a solucionar problemas ambientales específicos generados en la etapa de algún proceso evaluada aisladamente, sin considerar las interacciones y consecuencias en el ecosistema, ni los problemas a largo plazo provocados (UNEP, 2012); esto no necesariamente reduce los impactos negativos ambientales, sociales y/o económicos; por lo contrario, por lo general únicamente es un intercambio de impactos.

---

<sup>27</sup> Cabe señalar que el término “Transferencia de beneficios” se usa en literatura económica, y no en la literatura científica o técnica.

Para acelerar la transición a una sociedad con patrones de producción y consumo más sostenible, en 2002 la UNEP y la Sociedad de Química y Toxicología Ambiental, en conjunto con gobiernos, academia, sociedad civil, industria y empresas, empezaron a promover el enfoque de análisis de ciclo de vida (ACV) (Hauschild et al, 2018).

Con esa perspectiva se empezaron a considerar los efectos ambientales, sociales y económicos de las cadenas de suministro completas desde la extracción y transformación de las materias primas, procesamiento y manufactura, distribución, uso del producto, reparación y mantenimiento, re-uso y reciclaje, recuperación de energía y disposición final de residuos, (UNEP, 2012; European Commission, 2010), esto es, todas las etapas del ciclo de vida. De hecho, la European Commission (2010) define el Ciclo de Vida como etapas consecutivas e interconectadas de un proceso.

A esta forma íntegra de evaluar los problemas ambientales se le llama Life Cycle Thinking y se puede (y debe) realizar en sectores tan diversos como agricultura, manufactura, energía, residuos, construcción, transporte, servicios (European Commission (s.f.) consultado el 19/04/2022). El principal objetivo del Life Cycle Thinking es reducir el consumo de recursos y las emisiones al ambiente, a la vez que se mejora el desempeño socio-económico del proceso en todas sus etapas (Life Cycle Initiative, 2022).

Existen diferentes acercamientos que involucran el Life Cycle Thinking; algunos son más complejos que otros, cada uno tiene diferentes requerimientos de información y la calidad de los resultados obtenidos varía, pero todos son válidos. Además del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), existen el ACV simplificado, el ACV híbrido, ACV social, huella de carbono, huella ecológica, huella de agua, entre otros (UNEP, 2012).

Un Análisis de Ciclo de Vida es un procedimiento estandarizado que reúne información y conocimientos técnicos y científicos basados en procesos reales, que permite una evaluación cuantitativa de los impactos ambientales de un producto en todas las etapas de su cadena productiva; por lo que a este tipo de análisis se le conoce coloquialmente “de la cuna a la tumba” y, más específicamente, se le conoce como ACV – basado en procesos (Azapagic, 2004; Hauschild et al, 2018).

Para realizar un ACV se requieren cuatro etapas (ISO, 2006; Hauschild et al, 2018):

- a) la definición del objetivo y de los alcances del estudio: en el cual se definen los límites y la profundidad del mismo, la unidad funcional<sup>28</sup>, los impactos a estudiar, límites, escenarios, zona geográfica, temporalidad.
- b) el inventario, en el que se recopila información técnica de entradas y salidas;
- c) la evaluación, en la que se obtienen los indicadores de impacto ambiental;

---

<sup>28</sup> La unidad funcional es una descripción cuantitativa de la función o servicio en estudio, y se usa como base de referencia para definir los flujos de entrada y salida del sistema (Hauschild et al, 2018)

d) la interpretación de resultados, en la que se resume y discuten los resultados y se dan recomendaciones.

Los resultados de los ACV pueden incluir información como: consumo de energía de proceso o de transporte, consumo de agua, generación de gases de efecto invernadero, generación de residuos sólidos, eutrofización, disminución de capa de ozono, toxicidad, potencial carcinogénico, acidificación del aire, agua o suelo; eutrofización de agua, generación de ozono, generación de polvos o partículas orgánicas e inorgánicas, ocupación de tierra, o degradación abiótica (UNEP, 2021b, European Commission, 2010), entre muchas más.

Puesto que con los resultados de un ACV se obtiene una cuantificación de los potenciales contaminantes generados en todas y cada una de las etapas involucradas en el proceso, es posible identificar las etapas de proceso prioritarias en las que se producen la mayoría de los impactos y cuáles son estos impactos; también se pueden identificar los impactos de dos productos diferentes o evaluar opciones de diferentes diseños del mismo proceso (Delacámara, 2008; Carnegie Mellon University, 2016; Nygren *et al*, 2010).

La metodología tradicional del ACV-basado en procesos tiene varias características positivas, como es que usan la perspectiva de ciclo de vida, cubren un amplio rango de problemas ambientales, son cuantitativos, y están basados en la ciencia. En cuanto a sus limitaciones, se encuentra el que los resultados no se impactos ambientales reales sino potenciales y estos son calculados con base a un comportamiento promedio del proceso, sin tomar en consideración eventos fortuitos (Hauschild *et al*, 2018). Además, este tipo de estudios tienen dos complicaciones principales: la primera es la definición de los límites del sistema a estudiar, lo que implica la profundidad y la precisión que se le quiera dar a la evaluación; la segunda limitante radica en que para poder hacer un ACV se requiere información de muchos otros ACV, y esto puede provocar un efecto de bucle de información (Carnegie Mellon University, 2016a).

Por otra parte, también existen los modelos económicos Input-Output (I-O), en los que se representan de forma matemática las transacciones monetarias entre sectores industriales; por lo tanto se pueden cuantificar los efectos directos e indirectos de los cambios en la economía. Si a estos modelos se les añade información de emisiones al ambiente, se obtienen los llamados modelos IO-ACV (Hauschild *et al*, 2018), también conocidos como ACV híbridos.

En los modelos IO-ACV no existen los dos problemas de definición de límites y de bucles de información expuestos anteriormente; sin embargo se tiene el problema de la agregación de la información ya que, por lo general, esta información se tiene a nivel macroeconómico; además, estos modelos incluyen pocas categorías de impacto ambiental (Carnegie Mellon University, 2016a).

Actualmente está ampliamente aceptado que los análisis de ciclo de vida son adecuados para obtener soluciones sustentables al evitar soluciones falsas que traspasen los impactos ambientales de una etapa del ciclo de vida a otra. De hecho, es una herramienta que se ha

usado para formular diversas políticas públicas en la Unión Europea, como Integrated Product Policy, Sustainable Consumption and Production, Sustainable Industrial Policy Action Plan, Green Public Procurement, EU Ecolabel, EU ecomanagement and Audit scheme, ecodesign y Retail Forum (European Commission, 2010).

Pero más allá de estos resultados, el valor de los estudios de ACV reside no tanto en los números finales, sino en la exploración y conocimiento que se obtiene de cada sistema estudiado (UNEP, 2021b).

## 1. BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN DE ESTUDIOS DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

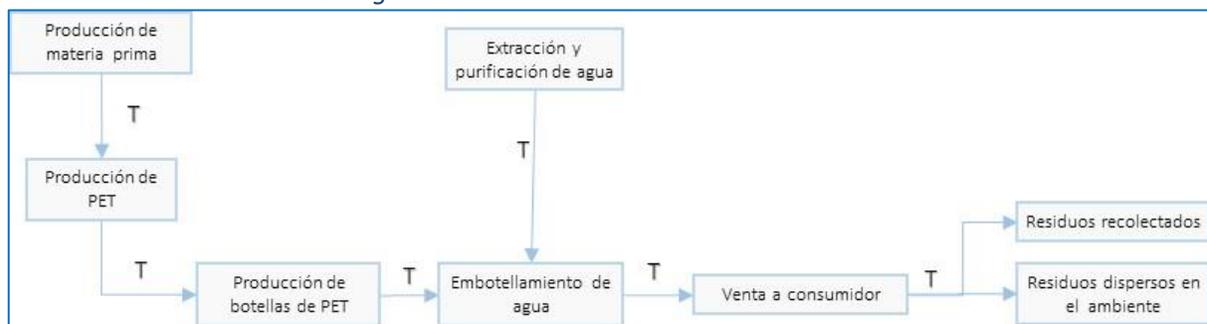
Para realizar este trabajo se utilizan ocho estudios de diferentes autores<sup>29</sup>. Cada estudio tiene diferentes supuestos y categorías de impacto reportadas; sin embargo, puesto que el proceso de producción de PET es el mismo, se considera que la tecnología es constante.

Para el caso del agua embotellada, las etapas del ciclo de vida a considerar se enlistan en seguida, y se muestran esquemáticamente en la Ilustración 6. Estas son las fronteras del sistema a estudiar.

Las etapas del Ciclo de Vida a estudiar son:

- Producción de materias primas
- Producción de PET
- Producción de botellas de PET y empaques secundarios
- Extracción o purificación de agua
- Embotellamiento de agua
- Enfriamiento de agua para venta al público
- Residuos recolectados o dispersos en el ambiente

*Ilustración 6 Ciclo de Vida del agua embotellada*



*Notas: T se refiere al transporte. Únicamente se muestra el esquema para PET virgen. No se incluye el reciclaje de residuos.*

<sup>29</sup> Aunque puede parecer poca información, es necesario enfatizar que no existe una disponibilidad infinita de estudios de ACV; de hecho, los estudios que se adaptan a las necesidades de este trabajo son escasos.

En los límites del sistema, por lo general no se incluyen la fabricación, construcción y mantenimiento de los equipos de proceso y vehículos; tampoco se incluye la extracción de materiales que, se asume, representan menos del 1% de los efectos totales (Dettore, 2009).

Para homogeneizar -en lo posible- se eligieron los estudios que cumplieran con las siguientes condiciones: que presentara resultados para el agua embotellada en PET virgen; que el transporte sí estuviera incluido; que se incluyera la opción de que los residuos se enviaran a un sitio de disposición final regulado, esto es, sin reciclaje o tratamiento final; por último, que los resultados estuvieran indicados explícitamente de manera numérica.

Los estudios elegidos son:

- a. Dettore (2009) hace un análisis de ciclo de vida comparativo entre de las botellas desechables de PET, de garrafones entregados a domicilio y del agua municipal de la llave. Se considera que la red de distribución del embotellador al distribuidor está limitada a 100 millas, y la del distribuidor al vendedor es de 20 millas, y del vendedor a casa es de 8 km. La botella se envía a un sitio de disposición final. El autor hace el estudio para Estados Unidos y usa información de ACV de la Association of Plastics Manufacturers of Europe; el software utilizado es el SimaPro 7.0.

*Tabla 4 Resultados de ACV Dettore (2009)*

UNIDAD FUNCIONAL: 1000 GAL <sup>30</sup>			%
Energía (MJ)	TOTAL	18601.7	
	Producción de botella de PET	13857.2	74.49
	Producción de empaque secundario	1582.3	8.51
	Embotellamiento	687.6	3.7
	Distribución agua embotellada	2202.5	11.84
	Transporte del consumidor	245.5	1.32
	Desecho	26.6	0.14
Residuos sólidos (kg)	TOTAL	197.9	
	Producción de botella de PET	13.0	6.57
	Producción de empaque secundario	7.7	3.89
	Embotellamiento	6.8	3.44
	Distribución	0.8	0.4
	Desecho	169.5	85.65
GWP <sup>31</sup> (kg CO <sub>2</sub> eq)	TOTAL	925.7	
	Producción de botella de PET	571.8	61.77
	Producción de empaque secundario	108.1	11.68
	Embotellamiento	40.2	4.34
	Distribución agua embotellada	159.6	17.24
	Transporte del consumidor	19.1	2.06
	Desecho (transporte)	26.8	2.9
Uso de agua (gal)	TOTAL	1954.3	
	Producción de botella de PET	175.0	8.95

<sup>30</sup> Un (1) galón = 3.785 litros

<sup>31</sup> GWP, son la siglas en inglés de Global Warming Potential, esto es, potencial de calentamiento global

	Embotellamiento	67.2	3.44
	Producción de electricidad	701.0	35.87
	Transporte	11.1	0.57
	Agua embotellada	1000	51.17

- b. Horowitz *et al* (2018) comparan botellas de diferentes materiales (resina PET virgen, resina PET reciclada, resina PET con aditivo para hacerla degradable, o ácido poliláctico) usadas para embotellar agua. Las distancias consideradas de transporte del productor de materia prima y de la botella son 237 y 799 km respectivamente. Se considera que la botella vacía se vierte en un relleno sanitario. El autor hace el análisis para EUA y usa el software SimaPro 8.

*Tabla 5 Resultados ACV de Horowitz et al (2018)*

UNIDAD FUNCIONAL: 12 BOTELLAS DE 500 ml		
CATEGORÍA DE IMPACTO		ETAPA QUE GENERA MAYOR MAS IMPACTO
Ocupación de tierra (m <sup>2</sup> arable)	0.0565	Manufactura de la botella
Calentamiento global <sup>32</sup> (kg CO <sub>2</sub> eq)	3.87	Distribución a almacenamiento
Energía no renovable (MJ)	69.4	Manufactura y distribución

- c. Nessi *et al* (2012) proponen diferentes escenarios para la reducción de residuos en Italia, y para eso comparan efectos ambientales provocados por botellas de PET (con materia prima virgen, reciclada, o biodegradable), fuentes de agua (bebederos) o agua de la llave, y uso de botellas o recipientes lavables; se toma en cuenta únicamente la opción de agua embotellada en PET virgen. La distancia considerada para la distribución es de 300 km, y 10 km del consumidor a casa. El autor hace el estudio para Italia y usa el software SimaPro 7.2.4.

*Tabla 6 Resultados de ACV de Nessi et al (2012)*

UNIDAD FUNCIONAL: 152.1 L	
CATEGORÍA DE IMPACTO	
Consumo de energía (MJ eq)	468.6
Calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> eq)	24.8
Residuos de PET (kg)	4.85

- d. Zollinger *et al* (2017) estudian el uso de energía, emisiones de gases de efecto invernadero y producción de residuos para agua embotellada de 8 onzas y 2.5 gal. Los autores no reportan qué distancia fue usada para calcular los impactos ocasionados por el transporte. Los residuos sólidos generados provienen de las etapas de manufactura y disposición final y son básicamente PET. En el resumen ejecutivo no se especifica el software usado y el estudio se hace para el mercado de Norteamérica, específicamente de Estados Unidos.

*Tabla 7 Resultados de ACV de Zollinger et al (2017)*

UNIDAD FUNCIONAL: 10000 GAL	
CATEGORÍA DE IMPACTO	

<sup>32</sup> El calentamiento global es causado principalmente por un aumento de la concentración de gases de efecto invernadero, principalmente CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, NO<sub>x</sub> y clorofluorocarbonos.

Cambio climático (kg CO <sub>2</sub> eq)	6920
Energía (MJ)	243000
Residuos sólidos	1609

- e. Garfí *et al* (20016) comparan los impactos ambientales de agua tratada con diferentes métodos y agua mineral con botellas de PET y de vidrio. En el caso del agua embotellada, se tomó en cuenta una distancia menor a 100 km para la distribución, y un reciclaje del 50% de las botellas de PET. Los autores usaron el software SimaPro, y el análisis se refiere al consumo en Barcelona, España.

*Tabla 8 Resultados de ACV de Garfí et al (2016)*

UNIDAD FUNCIONAL: 1 m <sup>3</sup>	
CATEGORÍA DE IMPACTO	
Cambio climático (kg CO <sub>2</sub> eq)	75.1

- f. Stypka *et al* (2014) hacen un análisis energético sobre el consumo de agua en Cracovia, Polonia. Tanto de suministro municipal como agua embotellada en PET. Consideran varias distancias recorridas para la distribución, sin embargo, se usaron los resultados para una distancia de 200 km. El autor usó dos diferentes artículos, uno usa el software SimaPro y otro una metodología propia, llamada Resource and Environmental Profile Analyses.

*Tabla 9 Resultados de ACV de Stypka et al (2014)*

UNIDAD FUNCIONAL: 1 LITRO	
CATEGORÍA DE IMPACTO	
Consumo de energía (MJ)	4.38
Emisiones de gases invernadero (kg CO <sub>2</sub> eq)	0.198

- g. García-Suarez *et al* (2019) hacen un estudio de comparación entre el agua hervida, agua embotellada y la purificación del agua doméstica por ósmosis inversa. En el caso del agua embotellada se incluye la producción y purificación del agua de la llave, la manufactura y transporte de las botellas vacías, del embotellado de agua y las operaciones de empaque, la distribución, considerando una distancia de 100 km, y la disposición final de la botella de PET después de su uso. Los autores usaron el software GaBi 6.4 y el estudio se hizo para India.

*Tabla 10 Resultados de ACV de García-Suarez et al (2019)*

UNIDAD FUNCIONAL: 20000L	
CATEGORIA DE IMPACTO	
Ocupación de tierra agrícola (m <sup>2</sup> arable)	251
Ocupación de tierra urbana (m <sup>2</sup> arable)	23.4
Cambio climático (kg CO <sub>2</sub> eq)	4270
Consumo de combustibles fósiles (kg petróleo eq)	1460
Disminución de agua (m <sup>3</sup> )	9300

- h. Franklin (2009) hizo un estudio comparativo entre agua embotellada en PET virgen, PET reciclado, PLA y vidrio). La distancia de distribución usada es de 50 millas de embotelladora a tiendas y 5 millas de tiendas a casa. No se considera enfriamiento. Los

residuos se envían a relleno sanitario. El autor usa la metodología Resource and Environmental Profile Analyses y hace el estudio para EUA, específicamente Oregon.

*Tabla 11 Resultados de ACV de Franklin (2009)*

UNIDAD FUNCIONAL: 1000 GAL	ETAPA		%
Energía (millones de BTU)	Total	15.024	
	Producción de botella de PET	11.35	75.56
	Producción de empaque secundario	1.57	10.45
	Purificación de agua	0.58	3.86
	Embotellamiento	0.022	0.15
	Transporte agua embotellada	1.24	8.25
	Tratamiento agua residual	0.0019	0.001
	Desecho	0.26	1.73
Residuos sólidos (lb)	Total	481	
	Producción de botella de PET	72.9	15.16
	Producción de empaque secundario	11.83	2.46
	Purificación de agua	10.4	2.16
	Embotellamiento	0.4	0.08
	Transporte agua embotellada	1.43	0.3
	Tratamiento agua residual	0.034	0.01
	Desechos	384	79.83
GWP (lb CO <sub>2</sub> eq)	Total	1605.42	
	Producción de botella de PET	1138	70.88
	Producción de empaque secundario	138.8	8.65
	Purificación de agua	87.8	5.47
	Embotellamiento	3.39	0.21
	Transporte agua embotellada	100.1	6.24
	Tratamiento agua residual	0.3	0.02
	Desecho (transporte)	137.03	8.54
Uso de agua (gal)	TOTAL (incluye 1000 gal bebible)	1250	

Existen dos puntos relevantes que discutir sobre estos trabajos: el número de estudios utilizados para la presente investigación, y el tema de las distancias usadas para calcular las emisiones a la atmósfera de cada uno de los estudios.

Respecto a la cantidad de estudios elegidos (en este caso, ocho) puede parecer escasa y cuyos resultados pueden considerarse estadísticamente no significativos. Por esta razón se investigó cómo se realizan las evaluaciones cuando se dispone de varios ACV.

Actualmente es posible el uso de varios ACV para evaluar el desempeño ambiental de un producto, ya sea con una “revisión sistemática” o un “meta-análisis”. Una revisión sistemática es una evaluación estructurada de la literatura para contestar una respuesta específica con una síntesis de la mejor evidencia disponible. Las revisiones sistemáticas varían en alcance, calidad y relevancia; pueden extender el alcance de los datos individuales al agrupar los resultados de tal forma que mejore el grado de certeza, exista menos error, o que se resuelva una pregunta completamente nueva con los datos existentes (Zumsteg et al, 2012).

Un meta-análisis combina datos de varios estudios, para responder preguntas que no podrían ser contestadas con un solo estudio, o para mejorar la certeza o el impacto de los hallazgos. Los meta-análisis pueden servir para definir las variables importantes para cada caso en particular, como por ejemplo, los límites del sistema, la definición de unidad funcional, consumo de materiales y energía, manejo de residuos, contexto geográfico, tipo de tecnología usada, la elección de indicadores de impacto ambiental, o las etapas de proceso con más impactos ambientales. Pueden ser cualitativos (o comparativos) o cuantitativos (Zumsteg et al, 2012).

Por ser este un acercamiento muy reciente, no existe una guía específica para hacer dicha revisión. Zumsteg et al (2012) propone la inclusión de factores clave para conducir y reportar revisiones sistemáticas, incluyendo meta-análisis, en los ACV: 1. Revisión de título, palabras clave y abstract; 2. Fundamentos; 3. Objetivos; 4. Descripción del protocolo de revisión; 5. Características de los estudios individuales; 6. Investigación del sesgo; 7. Síntesis de métodos; 8. Limitaciones; 9. Resultados y conclusiones.

Llevar a cabo un meta-análisis de Análisis de Ciclo de Vida es complicado, porque es probable que cada estudio tenga diferentes parámetros y además, el número de estudios de ACV para un cierto producto es limitado. No obstante, esto no es un impedimento para que se hagan meta-análisis o revisiones de los estudios previos, siempre y cuando no se pierda de vista las limitantes que esto puede tener, esto es, que son únicamente una referencia o un estimado inicial. En caso de requerir resultados más precisos, deberá hacerse un estudio particular.

De hecho, existen ejemplos de meta-análisis que utilizan pocos ACV para su estudio. Uno de ellos es el reporte “Single-use plastic tableware and its alternatives” de la UNEP (2021b), en el que se especifica que es “un meta-análisis” en el cual se usan seis estudios de ACV. El análisis de la información es de tipo cualitativo.

El estudio “Meta-analysis of soybean-based biodiesel” (Sieverding et al, 2015) utiliza nueve estudios de ACV, para evaluar el potencial de calentamiento global, la eutrofización y la acidificación. Evalúa máximos, mínimos y valores promedios, a pesar de la limitación de información.

Obviamente, existen otros ejemplos de meta-análisis en los que se utilizan 15, 20 o hasta 50 artículos científicos.

A pesar de únicamente disponer (en el momento en que se hizo la selección) de 8 estudios, el estudio se lleva a cabo, en el entendido que es mejor hacer una evaluación inicial con poca información, que no hacer ninguna evaluación. Por lo mismo, no se debe perder de vista que los resultados que se obtengan son un estimado inicial o preliminar del impacto ambiental del agua embotellada.

Puesto que en los estudios siempre existirán diferencias respecto al sistema en estudio, para mejorar la confiabilidad de la información se sugiere hacer un ACV específico para las condiciones particulares de Ciudad de México.

En relación al tema de la contaminación del aire proveniente de fuentes móviles, que son dependientes de la distancia que recorren los vehículos, es necesario hacer una aclaración: en este trabajo no se hizo ninguna investigación específica para poder saber las distancias recorridas por camiones de carga, transporte del productor, transporte del comerciante o transporte del consumidor, que se usan en la industria del agua embotellada en Ciudad de México.

En los ocho ACV se define la distancia del transporte (de carga y particular) que usa para su investigación dependiendo de las condiciones particulares de cada estudio (y que en muchos casos, fueron simplemente estimadas). Esto es, los resultados de las categorías de impacto ambiental reportadas son dependientes de la distancia incluida en cada estudio, y en cada uno son diferentes.

Esto, sin duda, es una fuente de imprecisión en los resultados. Para mejorar la calidad de los resultados, por lo menos los resultados referentes al transporte y la distribución deberían indicarse de forma unitaria por distancia recorrida. Sin embargo, la información que generalmente se presenta en los ACV no da detalles sobre los diferentes factores de emisión utilizados para calcular las emisiones totales del transporte de carga y el privado, y tampoco se especifican los detalles de los productos transportados, por lo que sería arbitrario hacer una diferenciación según tipo de transporte.

En su estudio, Kan *et al* (2022) minimizan la disparidad de resultados de la etapa de transporte de los diferentes productos que compara, haciendo un cálculo propio usando información de emisiones según el tipo de vehículo reportadas en Eco-invent<sup>33</sup>, y asumiendo las distancias promedio de transporte: 200 km del productor del empaque a la manufactura, 1640 de km entre productor y comercio al menudeo, 6.45 km de transporte particular y 32.19 km hacia el sitio de disposición final del residuo. Las emisiones generadas por etapa por cada tipo de transporte son calculadas de acuerdo a:  $E_T = \sum (Distancia_i * peso \text{ de empaque transportado}_i * E_i)$ .

Esta metodología es interesante y útil, siempre y cuando se disponga de información para hacer los cálculos. Sin embargo, no puede aplicarse en el caso del presente trabajo porque, aunque se podrían unificar distancias y suponer factores de emisión para cada tipo de transporte, se desconoce el peso transportado, sobre todo en las etapas de producción de las diferentes materias primas.

En el caso de este trabajo en particular, por no haber estado en los alcances iniciales de este proyecto, no se investigaron las distancias que recorren los camiones de los productores de

---

<sup>33</sup> Eco-invent es una base de datos que se usa en los inventarios de ciclo de vida.

materia prima, ni los camiones distribuidores de agua en Ciudad de México, ni tampoco se tienen estimaciones de la distancia promedio que recorren los consumidores para abastecerse de agua embotellada ni del tipo de transporte que se usa.

Por lo tanto, debido a la falta de información y a que no es posible adaptar a las condiciones de Ciudad de México la información de los ACV, se dejan los valores como los reportan los autores.

No obstante, no debe perderse de vista que los resultados reportados por cada autor son específicos para las distancias indicadas y sería adecuado, por su relevancia, incluirlas como parámetro de estudio en futuras investigaciones.

## 2. IDENTIFICACIÓN DE LAS CATEGORÍAS DE IMPACTO RELEVANTES

Las Categorías de impacto ambiental de este trabajo se escogieron principalmente, por factores como frecuencia de reporte y relevancia para este estudio, además de disponibilidad de información relativa a costos ambientales unitarios, que se utilizan más adelante. Las categorías elegidas para este estudio son:

- a) Consumo de energía, en MJ, como indicador del agotamiento del petróleo.
- b) Generación de residuos sólidos, en Kg, ya sea totales o específicamente PET
- c) Potencial de calentamiento global, en Kg de CO<sub>2</sub> eq, como indicador de la contaminación atmosférica
- d) Volumen de agua bebible embotellada, en L, como indicador del agotamiento de agua subterránea.
- e) Ocupación de tierra arable, en m<sup>2</sup>, como indicador de contaminación de suelo
- f) Consumo de agua de proceso, en L, como indicador de contaminación del agua

Las primeras cuatro categorías de impacto están directamente relacionadas con la problemática del agua embotellada, esto es, fabricación del PET con recursos no renovables; el uso de combustible fósil para el transporte de la mercancía y la consecuente contaminación atmosférica; el uso del agua superficial y subterránea en una zona de escasez que provoca agotamiento del acuífero; y la generación de residuos sólidos no degradables.

La ocupación de tierra arable se eligió como referente de la contaminación de suelo, esto es, el área de suelo que usan las instalaciones industriales, comerciales o vías de comunicación requerirían un tratamiento para regresar a sus condiciones originales. El consumo de agua de proceso se eligió como indicador de la contaminación de agua porque es precisamente durante los procesos industriales (extracción y transporte de materia prima, producción de materiales) donde se contamina la mayor parte de las aguas, que requieren tratamiento.

El propósito de los estudios de Ciclo de Vida es evaluar todos los tipos de impactos ambientales; no obstante, existe una tendencia en enfocarse en las emisiones de gases de efecto invernadero y el impacto climático asociado (UNEP, 2010), dándoles menos

importancia a otras. Efectivamente, los impactos de los residuos plásticos sobre la biodiversidad marina y terrestre están completamente ausentes en dichos estudios (UNEP, 2021b).

Además, es necesario decir que, debido a que las investigaciones sobre los efectos de la toxicidad del PET tanto en organismos vivos como en los diferentes ecosistemas son muy recientes y que no existe información de valoración económica con la cual se puedan cuantificar los daños, esta categoría de impacto no se incluye en el presente estudio. Sería interesante poder incluir este rubro en algún estudio posterior.

### 3. DEFINICIÓN DE UNIDAD FUNCIONAL Y CÁLCULOS DE IMPACTOS AMBIENTALES

Una parte fundamental de los ACV es elegir una unidad funcional, con la que se va a realizar el estudio. La unidad funcional es la descripción cuantitativa inicial del sistema a analizar y la base para determinar y escalar los flujos de referencia del producto (Hauschild et al, 2018). Al usar una misma unidad funcional se pueden comparar resultados de diferentes sistemas.

Para este estudio se eligió para este trabajo una Unidad Funcional igual a 1 litro de agua embotellada en PET, por su practicidad y dimensión humana. En adelante, en este trabajo esta unidad funcional será llamada “1 botella”.

Unidad Funcional = 1 litro de agua embotellada en PET = 1 botella

Los resultados de los estudios mostrados de la Tabla 4 hasta la Tabla 11, tienen diferentes unidades según la preferencia de cada autor, y además hacen referencia a diferentes unidades funcionales, esto es, la cantidad de agua embotellada a la que están referidos todos los cálculos. Por lo tanto, es necesario hacer el cambio a la unidad funcional elegida para este estudio y además el cambio de unidades a las unidades del Sistema Internacional de Medidas.

Para los resultados presentados por Dettore (2009) se dividen todos los valores de categoría de impacto entre 3.7854, para hacer el cambio de galones a litros, y después todo se divide entre 1000, para cambiar la unidad funcional de 1000 L a 1 L. Los valores presentados por Nessi et al (2012) únicamente se dividen entre 152.1L, para tener los valores en unidad funcional de 1 L. Horowitz et al (2018) se dividen los valores entre 12 y luego entre 0.5, porque la unidad funcional del autor es “12 botellas de 0.5 L”. Para los valores de Stypka et al (2014) no se requiere ningún cálculo. Garfí et al (2016) usa como unidad funcional 1 m<sup>3</sup>, por lo que los resultados deben dividirse entre 1000, para llegar a la unidad funcional a 1 L. García-Suarez et al (2019) usan como unidad funcional 20000 L, por lo que los valores deben dividirse entre 20000. Por último, Franklin (2009) presenta sus valores con una unidad funcional de 1000 galones y en unidades inglesas; para convertir BTU a Joules se multiplica por 1055.56, y para convertir de libra a kilogramo se multiplica por 0.454; después se cambia la unidad funcional elegida por el autor que es 1000 galones, dividiendo entre

3.78541 para cambiar galones y luego dividiendo entre 1000 para llegar a la unidad funcional de 1 L.

Después de haber homogeneizado unidades y unidad funcional se calculan los promedios para cada categoría de impacto. Los resultados se muestran en la Tabla 12.

*Tabla 12 Resultados de Categorías de Impacto obtenidas por ACV, por botella*

CATEGORÍAS DE IMPACTO AMBIENTAL PARA 1 BOTELLA					
Autor*	Consumo de Energía (MJ)	Residuos sólidos totales (kg)	Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> eq)	Ocupación de tierra arable (m <sup>2</sup> )	Uso de agua de proceso (L)
1	4.914	0.052	0.2445		0.954
2	11.567		0.645	0.009420	
3	3.081	0.032	0.163		
4	6.419	0.04251	0.1828		
5			0.075		
6	4.38		0.198		
7	3.066		0.2135	0.01372	0.26
8	4.189	0.0461	0.1926		0.25
<b>MÁXIMO</b>	<b>11.567</b>	<b>0.052</b>	<b>0.645</b>	<b>0.01372</b>	<b>0.954</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>5.3737</b>	<b>0.04315</b>	<b>0.2393</b>	<b>0.011568</b>	<b>0.488</b>
<b>MÍNIMO</b>	<b>3.066</b>	<b>0.032</b>	<b>0.075</b>	<b>0.00942</b>	<b>0.25</b>

\* (1) Dettore (2009); (2) Horowitz et al (2018); (3) Nessi et al (2012); (4) Zollinger et al (2017); (5) Garfí et al (2016); (6) Stypka et al (2014); (7) García-Suarez et al (2019); (8) Franklin (2009)

De acuerdo al valor promedio de consumo de energía por cada litro de agua embotellada es de 5.3737 MJ, se generan 0.04315 kg de residuos sólidos, se generan 239.3 g de CO<sub>2</sub> eq, se requieren 0.0116 m<sup>2</sup> de área superficial, y se usan 0.488 litros de agua de proceso además del volumen de agua potable embotellada, que es 1L.

Es interesante notar que de los autores elegidos, siete reportan consumo de energía y ocho reportan potencial de calentamiento global, tres reportan consumo de agua de proceso, cuatro reportan generación de residuos sólidos totales y dos reportan ocupación de tierra arable.

## B. CÁLCULOS AUXILIARES (BALANCES DE MATERIA)

Esta sección se hacen algunos cálculos de balances de materia preliminares, necesarios para determinar los requerimientos de petróleo y agua, generación de residuos sólidos y contaminación ambiental para la unidad funcional elegida. Los resultados obtenidos aquí se usan posteriormente. Esta sección tiene como fin único facilitar la lectura de los lectores.

En este trabajo se considera que el peso promedio de una botella de 1L de PET es de 23.7 gramos, según lo reportado en Lagioia et al (2012).

## 1. PETRÓLEO

Con el consumo de energía obtenido en la *Tabla 12* se puede encontrar el volumen de petróleo, en barriles y en litros, para producir 1 L de agua embotellada. Para ello hay que considerar que 1 kg de petróleo equivalente contiene 42 MJ y que la densidad promedio aceptada mundialmente es de 126.4 kg por barril de petróleo (BP, 2014); además 1 barril es igual a 158.987 L. El cálculo es:

$$\frac{5.3737 \text{ MJ}}{1 \text{ botella}} * \frac{1 \text{ Kg de petróleo}}{42 \text{ MJ}} * \frac{1 \text{ barril petróleo}}{126.4 \text{ Kg petróleo}} = 0.0010122 \frac{\text{barril petróleo}}{1 \text{ botella}}$$

$$\frac{0.0010122 \text{ barril petróleo}}{1 \text{ botella}} * \frac{158.987 \text{ L}}{1 \text{ barril}} = 0.1609 \frac{\text{L petróleo}}{1 \text{ botella}}$$

En la *Tabla 13* se pueden encontrar los valores mínimos y máximos a producir, que son 459 y 1731 botellas de PET, respectivamente, con un promedio de 988 botellas.

*Tabla 13 Consumo energético de producción de agua embotellada*

Energía (MJ)	Volumen (Barriles petróleo/1 botella)	Volumen (L petróleo /1 botella)	Botellas de PET producidas con 1 barril de petróleo
3.066 (min)	0.000577	0.092	1731
5.3737 (prom)	0.0010122	0.161	988
11.567 (max)	0.00218	0.347	459

Según los resultados arriba mostrados, para producir un litro de agua embotellada se gasta entre 0.09 y 0.35 L de petróleo. En otras palabras, se pueden producir en promedio, 988 botellas de agua con 1 barril de petróleo.

Los resultados de dicha tabla son similares a los resultados presentados por Gleick et al (2009); dicho autor que obtiene como resultado un consumo de energía por cada litro de agua embotellada de entre 5.6 y 10.2 MJ; estas variaciones se deben a factores como eficiencia energética del proceso, localización y tipo de la fuente de agua, distancia del embotellador al consumidor, tipos de material de los empaques secundarios utilizados, método de transporte y distancias recorrida tanto en las etapas de producción como de la entrega al distribuidor.

## 2. AGUA

El agua está involucrada en los procesos de extracción y procesamiento de materias primas y combustibles y de la botella en sí, además del agua potable bebible que se usa. En esta sección se estima la procedencia del agua, de acuerdo a la información disponible.

De acuerdo a la investigación de Lanuza (2017) la industria embotelladora en la Cuenca del Valle de México se aprovisiona de dos fuentes de agua: subterránea o acuíferos (70%) y suministro público urbano (30%); en Ciudad de México el consumo de agua subterránea sube a 73%.

Adicionalmente, se dispone de información del Diario Oficial de la Federación (2016), que se encuentra en la Tabla 14, en la que se desglosa la procedencia del agua de suministro público de Ciudad de México: el agua del suministro público se obtiene en un 41.3% del acuífero (agua subterránea) y el resto (58.7%) es de agua superficial.

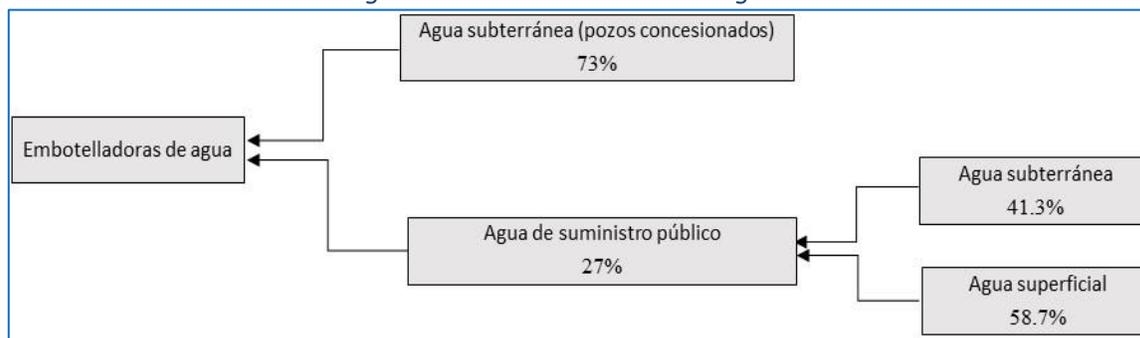
*Tabla 14 Volumen de agua suministrada a la Zona Metropolitana de Ciudad de México*

Fuente	2008*	2016**
	%	%
Agua subterránea del acuífero ZMCM	68	41.3
Sistema Cutzamala	17	31.7
Acuífero del Alto Lerma	5	8.1
Sistema Plan de acción inmediata (Transferencias del acuífero Cuautitlán-Pachuca)		15.5
Sistema Chiconautla		2.1
Aguas superficiales de la Presa Madín y el Río Magdalena	3	1.3
Agua reciclada	7	

Referencias: \* CONAGUA (2018); \*\*DOF (2016)

Puesto que el consumo de agua de la industria embotelladora proviene en un 27% del suministro público, y éste se aprovisiona de un 41.3% del acuífero, esto significa la industria embotelladora usa un 11.15% de agua subterránea contenida en el agua de suministro público, adicional al 73% de agua subterránea extraída de sus propios pozos; esto es en total un 84.15%; el agua superficial utilizada para embotellar será el 15.85% (Ilustración 7).

*Ilustración 7 Procedencia del agua de las embotelladoras de agua de Ciudad de México*



*Tabla 15 Distribución del uso de agua superficial y agua subterránea de la industria embotelladora en Ciudad de México*

	Acuíferos propios (73%)	Suministro público (27%)	TOTAL (%)
Subterráneo	100%	41.3%	$73 + (41.3 \times 0.27) = 84.151$
Superficial	0	58.7%	$0 + (58.7 \times 0.27) = 15.85$

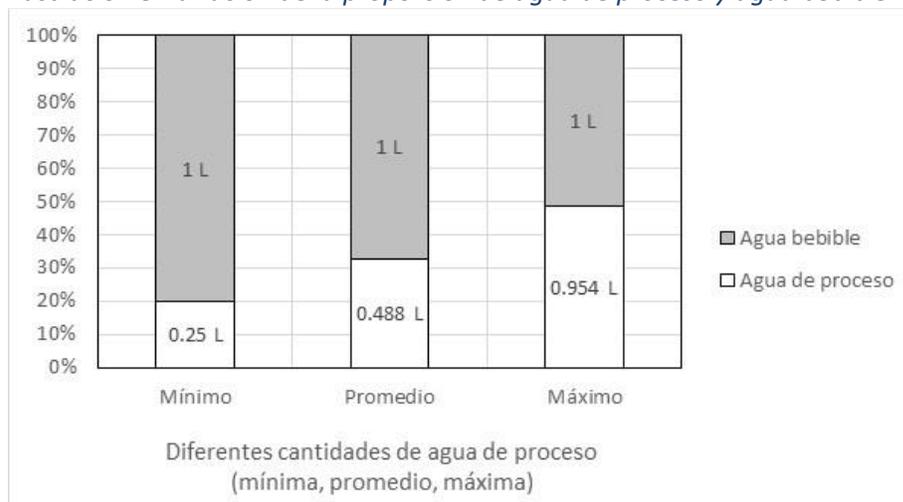
Fuente: cálculos propios con información de Lanuza (2017) y DOF (2016)

A continuación se calcula la cantidad de agua que se usa en proceso y que se usa para embotellar, de acuerdo a su origen, subterránea o superficial.

En la Tabla 12 se muestra que para la producción de agua embotellada se requiere un promedio de 0.488L de agua de proceso por cada litro de agua embotellada (con 0.25 L y 0.954 L mínimo y máximo, respectivamente). Puesto que el agua bebible es 1 Litro

(equivalente a la unidad funcional), la proporción del agua bebible embotellada varía entre el 51% y el 80% del agua total usada, mientras que la proporción del agua de proceso varía entre el 20% y el 48.8% (Ver Ilustración 8).

*Ilustración 8 Variación de la proporción de agua de proceso y agua bebible*



Con la información de la Tabla 12 y Tabla 14 se puede calcular la distribución de agua subterránea y superficial, tanto para agua de proceso como para agua embotellada. Los resultados se muestran en la Tabla 16 y en Ilustración 9.

*Tabla 16 Balance de agua según su origen y destino, para Ciudad de México, para 1 botella*

Destino del agua	Volumen total (L/1 botella)	Origen del agua	
		Volumen de agua superficial (L/1 botella)	Volumen de agua subterránea (L/1 botella)
Agua de proceso prom.	0.488	0.4880	0
Agua bebible	1	0.1585	0.8415
<b>TOTAL</b>	<b>1.488 (100%)</b>	<b>0.6465 (43.45%)</b>	<b>0.8415 (56.55%)</b>

En la misma tabla se hacen los cálculos para las cantidades máxima y mínima de agua de proceso. El volumen máximo de agua de proceso es de 0.954L, promedio de 0.488 L y el mínimo de 0.25 L, que corresponden al 49%, 32.8% y 20%, respectivamente. El agua de proceso proviene exclusivamente de fuentes superficiales<sup>34</sup>.

En resumen, la cantidad de agua bebible es 1 L (la unidad funcional elegida), cuya procedencia es 0.8415 L de agua subterránea y 0.1585 L de agua superficial. El agua subterránea utilizada en todo el ciclo de vida del agua embotellada es, en promedio, el 56.55% del volumen total de agua utilizada, pudiendo variar el porcentaje entre 43% y 67%, según la cantidad de agua de proceso utilizada.

<sup>34</sup> En este estudio, se considera que el PET no se fabrica en Ciudad de México, por lo que es correcto suponer que el agua de las todas las etapas de producción, embotellamiento, producción de electricidad y transporte es agua proveniente de fuentes superficiales.

Ilustración 9 Balance de agua de 1 botella, por procedencia y destino para Ciudad de México

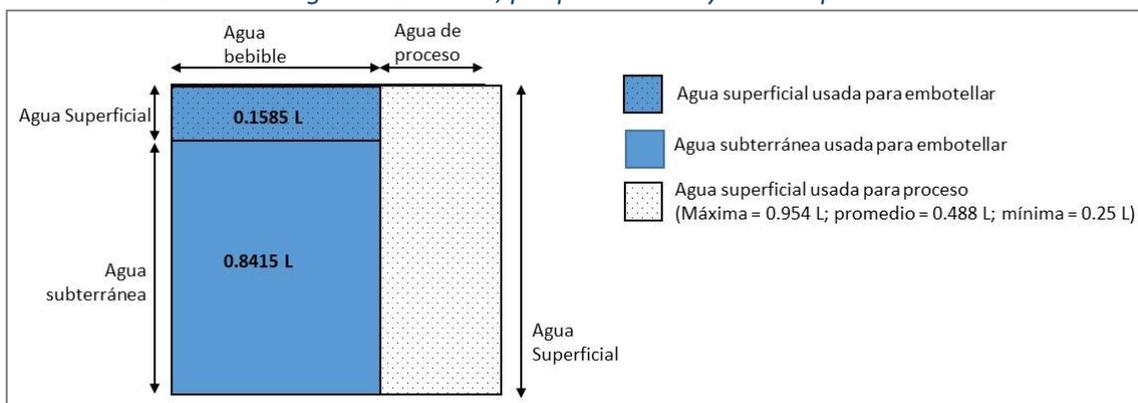


Tabla 17 Diferentes volúmenes y proporciones de agua de proceso, bebibible, superficial y subterránea utilizados, 1 botella

	Máximo	Promedio	Mínima
Agua de Proceso (L / botella)	0.954 (48.8%)	0.488 (32.8%)	0.25 (20%)
Agua bebibible (L/ botella)	1 (51.2%)	1 (67.2%)	1 (80%)
Agua total = Agua de proceso + agua bebibible (L/ botella)	1.954	1.488	1.25
Agua Superficial = 0.1585 L + agua de proceso (L/botella)	1.1125 (56.9%)	0.6465 (43.45%)	0.4085 (32.7)
Agua subterránea (L/ botella)	0.8415 (43.1%)	0.8415 (56.6%)	0.8415 (67.3%)

### 3. RESIDUOS SÓLIDOS

De los estudios de ACV elegidos, 4 reportan la generación de residuos sólidos totales (Tabla 12). Los residuos totales engloban los generados durante los procesos y también los residuos sólidos secundarios como las etiquetas, tapas, cajas, amarres, entre otros. Como se explicó anteriormente, se considera que una botella de PET de 1 L pesa 23.7 g

En este estudio se hace una distinción en cuanto al destino final de los residuos, esto es, sitios de disposición controlada (los que son recogidos y gestionados por el gobierno de la ciudad), y los que no llegan a dichos sitios y permanecen dispersos en cualquier lugar.

Según ECOCE ([www.ecoce.mx/fichas-tecnicas-por-estado](http://www.ecoce.mx/fichas-tecnicas-por-estado), consultado el 9/2/2022) en Ciudad de México se logra un acopio del 96% del PET total, que se envía a reciclaje. Esto es, sólo el 4% no se dispone adecuadamente y queda disperso en el ambiente.

También ECOCE reporta que el porcentaje de recolección de RSU de Ciudad de México es del 79%, esto es, el 21% no llega a un relleno sanitario y queda disperso en el ambiente.

En la Tabla 18 se muestra el desglose de los residuos sólidos totales y residuos de botellas de PET que se recolectan y que permanecen en el ambiente.

*Tabla 18 Destino final de los residuos sólidos totales promedio y residuos de PET, en g/ botella*

TIPO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	Total	Recolectados	Dispersos en el Ambiente
Residuos sólidos totales promedio = 43.15 g/botella			
Residuos por botellas de PET	23.7	22.752 (96% de residuos total de botellas de PET)	0.948 (4% de residuos total de botellas de PET)
Residuos sólidos sin incluir PET	19.45	15.3655 (79% de RST sin incluir botellas de PET)	4.0845 (21% de RST sin incluir botellas de PET)
TOTAL	43.15	38.118	5.033

Los mismos cálculos se hacen para los valores máximos y mínimos de los residuos sólidos totales reportados en la Tabla 12 (recordar que la cantidad de residuos de botellas de PET no varían porque la unidad funcional es 1 botella de agua), y con los resultados obtenidos se puede construir la Tabla 19.

*Tabla 19 Destino final de los residuos sólidos totales máximo, mínimo y promedio, en g/botella*

RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	Total	Recolectados (RSU)	Dispersos en el Ambiente
	g/botella		
Máximo	52.0	45.109	6.891
Promedio	43.15	38.1175	5.0325
Mínimo	32.0	29.309	2.691

De acuerdo a los resultados anteriores, los residuos sólidos urbanos totales generados durante el ciclo de vida de una botella de agua son en promedio 38.1175 g/botella (con un máximo de 45.109 g/botella y un mínimo de 29.309 g/ botella); esto representa entre el 84.4 - 91.6% del total de residuos generados. La cantidad de residuos que se dispersan en el ambiente se encuentra entre 2.691 - 6.891 g/botella, cantidad que representa del 8.4% al 13.2% del total de residuos generados.

#### 4. DISTRIBUCIÓN DE IMPACTOS ENTRE EMPAQUE Y CONTENIDO

Aun cuando el objeto de estudio de este trabajo es el agua embotellada, es interesante también analizar la contribución a las categorías de impacto de cada uno de los dos componentes del agua embotellada -agua y botella- por separado.

Es importante insistir que los porcentajes obtenidos en esta sección así como los resultados que se obtengan con estos valores, son *únicamente estimativos*. A pesar de ello, se incluyen como una ejemplificación de la importancia de usar este tipo de desglose para lograr una evaluación diferenciada de los daños ambientales del agua y del envase.

Para ello, primeramente se parte de la información desglosada sobre los impactos ambientales por etapa de proceso que tanto Dettore (2009) como Franklin (2009) presentan en la Tabla 4 y Tabla 11; se toman en cuenta únicamente estos dos autores porque son los únicos que reportan los resultados de cada categoría de impacto con desglose por etapa del ciclo de vida.

A partir del desglose por etapas que presentan ambos autores, se determina si el daño ambiental corresponde al envase o al contenido. Los efectos en el medio ambiente de los procesos de producción de materia prima, procesos secundarios, y parte proporcional del transporte y desecho se le asignan al PET; mientras que los efectos de los procesos de purificación del agua bebible y la parte proporcional del transporte se asignan al agua. Por ejemplo: el agotamiento de petróleo de la etapa de procesos de producción de PET se debe al envase o PET; el agotamiento de agua subterránea en la etapa de embotellamiento se debe al contenido (agua bebible). Siguiendo esa misma lógica se construye la Tabla 20.

*Tabla 20 Contribución del envase o contenido a las categorías de impacto ambiental*

CATEGORÍA DE IMPACTO	ETAPA DEL CICLO DE VIDA	
Agotamiento de Petróleo	Procesos de Producción de PET	P
	Transporte agua embotellada	P, A
	Purificación de agua	A
	Desecho	P
Contaminación por RSU	Procesos de producción de PET	P
	Transporte agua embotellada	P, A
	Purificación de agua	A
	Desecho	P
Contaminación del aire (Fuentes fijas)	Procesos de producción de PET	P
	Embotellamiento	P, A
	Purificación de agua	A
Contaminación del aire (Fuentes móviles)	Desecho (transporte)	P
	Transporte agua embotellada	P, A
Agotamiento Agua subterránea	Embotellamiento	A
Consumo de Agua superficial	Procesos de Producción	P
	Embotellamiento	A

\* P: PET o envase; A: agua bebible o contenido

Para construir la Tabla 21, se agregan los porcentajes en que cada etapa del ciclo de vida contribuye a las diferentes categorías de impacto. La categoría de impacto de Ocupación de Tierra Arable no se incluye en la tabla anterior, porque no se cuenta con información desglosada en ninguno de los trabajos revisados.

*Tabla 21 Contribución porcentual de las etapas de ciclo de vida a las categorías de impacto ambiental*

CATEGORÍA DE IMPACTO	ETAPA DEL CICLO DE VIDA	Dettore (2009)	%	Franklin (2009)	%
Agotamiento de Petróleo	Procesos de Producción	74.49+8.51	83	75.56+10.45	86.01
	Embotellamiento	3.7	3.7	0.15	0.15
	Transporte agua embotellada	11.84+1.32	13.16	8.25	8.25
	Purificación de agua bebible			3.86	3.86
	Tratamiento de agua residual			0.001	0.001
	Desecho	0.14	0.14	1.73	1.73
Contaminación por RSU	Procesos de producción	6.57+3.89	10.46	15.16+2.46	17.62
	Transporte agua embotellada	0.4	0.4	0.3	0.3
	Purificación de agua bebible			2.16	2.16
	Embotellamiento	3.44	3.44	0.08	0.08

	Tratamiento de agua residual			0.01	0.01
	Desecho	85.65	85.65	79.83	79.83
Contaminación del aire (Fuentes fijas)	Procesos de producción de PET	61.77+11.68	73.45	70.88+8.65	79.53
	Embotellamiento	4.34	4.34	0.21	0.21
	Tratamiento de agua residual			0.02	0.02
	Purificación de agua			5.47	5.47
Contaminación del aire (Fuentes móviles)	Desecho (transporte)	2.9	2.9	8.54	8.54
	Transporte agua embotellada	17.24+2.06	19.3	6.24	6.24

*Nota: Información tomada de la Tabla 4 y la Tabla 11.*

En dicha tabla se observa que la categoría de impacto que más difiere entre ambos autores es la contaminación del aire provocada por fuentes móviles. Esto es así porque la contaminación atmosférica por fuentes móviles se refiere a la proveniente del transporte industrial, comercial y doméstico; la cantidad de contaminación que causan los vehículos es directamente proporcional a la distancia que recorren, al peso que transportan, al tipo de combustible, motor y estado mecánico del mismo. Debido a esto, la generación de contaminantes atmosféricos es muy variable, según las consideraciones que se hagan.

Efectivamente, los dos autores consideran diferentes distancias para el transporte: Dettore (2009) considera que la red de distribución tiene un máximo de 100 millas, del distribuidor al vendedor tiene 20 millas y del vendedor a casa 8 km. Por su parte, Franklin (2009) considera la distancia de distribución de 50 millas y de 5 millas de tiendas a casa.

Al respecto, la información disponible para Ciudad de México acerca de los viajes de las flotillas repartidoras de las empresas grandes, medianas y pequeñas en esta ciudad es muy limitada. Jaller et al (2015) en su trabajo titulado “Quantifying the impacts of sustainable city logistics measures in the Mexico City Metropolitan Area” estiman la distancia promedio recorrida por vehículos mercantiles en función del tamaño de la flotilla. Puesto que las grandes compañías embotelladoras tienen una gran flotilla repartidora mayor a 500 vehículos (Gama, 2020; Rodríguez, 2017), se estaría recorriendo 48 Km por viaje, que corresponden a 29.8 millas por viaje. Esta distancia es más parecida a la utilizada por Dettore (2009) que es 20 millas, que la de Franklin (2009) que es de 50 millas. Esto significa que los resultados referentes a la contaminación atmosférica por fuentes móviles presentados por Dettore (2009) pueden representar de mejor manera a las emisiones en Ciudad de México. Por lo tanto, para hacer los repartos de impactos entre el PET y el agua embotellada, se tomarán los valores reportados por Dettore (2009).

A continuación se reagrupan los resultados obtenidos en la tabla anterior, para encontrar la contribución individual del PET y del agua bebible a las categorías de impacto. Este procedimiento puede asemejarse con el Análisis distribucional de Impactos Económicos propuesto por Tietenberg *et al* (2012). Para ello, se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

Puesto que durante el transporte y distribución del agua embotellada necesariamente se transportan los dos componentes (PET y agua), para hacer un desglose adecuado se va a considerar que los efectos de la contaminación atmosférica son proporcionales al peso

transportado. Puesto que por cada botella de 1L de agua embotellada hay 1000 g de agua y 23.7g de la botella de PET, esto quiere decir que el 97.7% de los impactos al aire se deben al agua y el 2.3% se deben al PET. Este mismo porcentaje se aplica para las etapas de embotellamiento.

Se considera que toda la contaminación de agua se asocia a la botella de PET. Esto debido a que los lodos residuales generados en los proceso de tratamiento y potabilización de agua no contribuyen significativamente a la contaminación de agua ni a la contaminación de la tierra manera significativa (García-Sánchez *et al*, 2019)

Los autores no reportan alguna proporción de uso de la tierra para los procesos industriales respecto a las áreas de distribución o áreas de depósito de residuos, por lo que no se puede hacer una asignación específica al PET o al agua.

El desglose de consumo del agua ya se había tratado en una sección anterior (ver Tabla 16) El balance de masa realizado indica que el 75.48% del total del agua de origen superficial se usa para procesos de producción; el restante 24.51% es la porción proveniente del suministro público que se usa para embotellar. El 100% del agua de origen subterránea se usa para embotellar (agua bebible o contenido).

Se considera que las etapas de distribución y transporte no contribuyen significativamente a la generación de residuos sólidos. Además, los residuos sólidos generados en la etapa de desecho se refieren al empaque, por lo que se atribuyen en su totalidad al PET.

Con información de la Tabla 20 y de la Tabla 21, y tomando en cuenta las consideraciones antes mencionadas, se puede construir la Tabla 22.

*Tabla 22 Estimación de la distribución de impactos ambientales de las diferentes etapas del ciclo de vida para el envase de PET y el agua bebible (según información de Dettore, 2009)*

	ETAPA DEL CICLO DE VIDA	PET	Agua bebible
		%	%
Uso de petróleo	Producción	83	
	Embotellamiento	$3.7*0.023=0.0851$	$3.7*0.977=3.6149$
	Purificación agua	0	
	Transporte	$13.16*0.023=0.3027$	$13.16*0.977=12.857$
	Desecho	0.14	
	Subtotal	83.528	16.472
Consumo de agua total		43.45	56.55
Consumo de agua superficial	Producción	75.5	
	Agua bebible		24.5
	Subtotal	75.5	24.5
Consumo de agua subterránea	Agua bebible	0	100
	Subtotal	0	100
Generación de residuos sólidos	Producción	10.46	
	Embotellamiento	$3.44*0.023=0.0791$	$3.44*0.977=3.3609$
	Transporte	$0.4*0.023=0.0092$	$0.4*0.977=0.3908$
	Purificación agua		0
	Desecho	85.65	

	Subtotal	96.1983	3.7517
Contaminación del aire (fuentes fijas)	Producción	73.45	
	Embotellamiento	$4.34 * 0.023 = 0.0998$	$4.34 * 0.977 = 4.2402$
	Purificación agua		
	Subtotal	73.5498	4.2402
	% fuentes fijas	94.55%	5.45%
Contaminación aire (fuentes móviles)	Transporte	$19.3 * 0.023 = 0.444$	$19.3 * 0.977 = 18.8561$
	Desecho	2.9	
	Subtotal	3.3439	18.8561
	% fuentes móviles	14.93%	85.07%
Contaminación del agua	Producción	100	

Los resultados que se muestran en las tablas anteriores son muy interesantes, porque permiten una apreciación más completa de la problemática ambiental del agua embotellada:

El PET es responsable en mayor proporción del agotamiento de petróleo (entre el 83%), básicamente durante los procesos de producción, y esto incluye la materia prima para el PET y los envases secundarios, y la energía requerida para llevar a cabo los procesos. El agua bebible es responsable del 16.47% del agotamiento del petróleo, principalmente por el transporte de la misma.

El PET también es responsable del consumo el 75.5% del agua superficial en los procesos de producción, pero un considerable 24.5% es atribuible al agua bebible que se embotella. El agua bebible es responsable del 100% del agotamiento del agua subterránea. Además, la contaminación del agua se debe exclusivamente a los procesos de producción del PET.

Como era de esperarse, más del 96% de los residuos generados se le deben al PET, mayoritariamente en la etapa de desecho de residuos.

En cuanto a la contaminación atmosférica por fuentes fijas, el PET es responsable de más del 94.5% del total de las emisiones de fuentes fijas, mientras que las emisiones gaseosas relacionadas con el agua se deben mayoritariamente al proceso de purificación.

En cuanto a las emisiones atmosféricas por fuentes móviles, como se explicó en algún párrafo anterior, la proporción que se le asigna al transporte del agua bebible y al PET es proporcional a su peso, por lo que del 100%, 97.7 puntos porcentuales le corresponden al agua y 2.3 puntos porcentuales corresponden al PET. Con estas consideraciones resulta que el PET es responsable del 15% de las emisiones por fuentes móviles y el agua bebible es responsable del 85% de las emisiones gaseosas por fuentes móviles.

La información y valores obtenidos en esta sección son, por si mismos, importantes e interesantes. Sin embargo surge la interrogante de cómo comparar las contribuciones de las diferentes categorías de impacto. Por esto surge la necesidad de calcular el costo ambiental de cada una de estas categorías, temas que se aborda más adelante.

## 5. CONTAMINACIÓN DEL AIRE

En este apartado se subdivide la contaminación del aire se según su fuente de procedencia, que pueden ser fuentes fijas (procesos) y fuentes móviles (transporte); esto para ser congruentes con la forma en que INEGI reporta los costos.

Esta subdivisión se hace simplemente diferenciando que la contaminación atmosférica proveniente por fuentes móviles son las reportadas en las etapas de distribución, transporte y transporte del desecho; mientras que la contaminación atmosférica proveniente de fuentes fijas son las reportadas en las etapas de producción, purificación, embotellamiento

*Tabla 23 Contribución al potencial de calentamiento global de cada etapa del ciclo de vida*

ETAPA DEL CICLO DE VIDA	Origen	Dettore (2009)		Franklin (2009)	
		%			
Producción de botella de PET	Fuente fija	61.77	80.69	70.88	93.77
Producción de empaque secundario	Fuente fija	11.68		8.65	
Purificación de agua	Fuente fija	-		5.47	
Embotellamiento	Fuente fija	4.34		0.21	
Tratamiento de agua residual	Fuente fija	-		0.02	
Desecho (transporte)	Fuente fija	2.9		8.54	
Distribución	Fuente móvil	17.24	19.3	6.24	6.24
Transporte del consumidor	Fuente móvil	2.06		-	

De la Tabla 23 se obtienen los siguientes resultados: Dettore (2009) reporta que las fuentes fijas (etapas de producción de materia prima, producción de la botella, producción de tapa y etiqueta, purificación de agua y embotellamiento) contribuyen al 80.69% de la generación de los gases atmosféricos; y las fuentes móviles (el transporte usado para las etapas de distribución del producto, transporte del consumidor, transporte del residuo) contribuye en un 19.3% del total. Por su parte, los resultados de Franklin (2009) reporta que el 93.77% de las emisiones provienen de las fuentes fijas, mientras que el 6.24% proviene de las fuentes móviles.

Los valores reportados de transporte y distribución difieren entre sí en un orden de magnitud, por lo que en este apartado se toman en cuenta los valores reportados por Dettore (2009), de la misma forma que en la sección anterior.

Para encontrar la contribución diferenciada del potencial de calentamiento global de fuentes fijas y de fuentes móviles se parte de la información de la Tabla 12, en la que se presentan los valores máximo, promedio y mínimo de Potencial de Calentamiento Global reportados por los autores (0.645, 0.2393 y 0.075 kgCO<sub>2</sub>eq/botella, respectivamente). Al multiplicar el valor del potencial de calentamiento global por el porcentaje indicado en la Tabla 23, como se muestra en el siguiente ejemplo, se obtiene los resultados de la Tabla 24.

$$0.645 \text{ kgCO}_2\text{eq} * 80.69\% \text{ fuentes fijas} = 0.5205 \text{ kgCO}_2\text{eq} \text{ fuentes fijas}$$

*Tabla 24 Contribución de fuentes fijas y fuentes móviles de Potencial de Calentamiento Global (según información de Dettore, 2009).*

Potencial de calentamiento global (kgCO <sub>2</sub> eq/botella)	Fuentes fijas (80.69%)	Fuentes móviles (19.3%)
Máximo = 0.645	0.5205	0.1245
Promedio = 0.2393	0.1931	0.0462
Mínimo = 0.075	0.0605	0.0145

Estos valores se van a usar en secciones posteriores para evaluar el impacto económico de la contaminación ambiental de fuentes fijas y móviles.

### C. CÁLCULO DEL COSTO AMBIENTAL UNITARIO

*“Las prácticas empresariales modernas perpetúan las injusticias medioambientales más allá de las fronteras” (UNEP, 2021).*

#### 1. BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN

Actualmente existen múltiples instituciones, compañías y organizaciones dedicadas al estudio de la valoración económica de recursos naturales. En esta sección del trabajo, se usa información obtenida en bibliografía, sobre la cuantificación o valoración de los costos ambientales del agotamiento de recursos naturales como el agua o el petróleo, y del costo de la contaminación de agua, suelo, aire y la causada por la generación y disposición de residuos sólidos.

La mayoría de la información sobre costos ambientales necesarios para realizar este trabajo se obtuvo de las Cuentas Económicas y Ecológicas del INEGI. Estos se complementaron con algunos otros valores para lograr un resultado más específico para Ciudad de México. Se decidió sustituir el costo de agotamiento del petróleo reportado por el INEGI por el costo de sustitución del petróleo por biomasa, como una mejor medida del costo del agotamiento del petróleo (la explicación extensa se encuentra en la sección correspondiente). Para encontrar un valor más adecuado para el agotamiento del acuífero del cual se abastece Ciudad de México, se analizaron algunos estudios en los que se calcula el costo de reposición de agua a los acuíferos por medio de infiltración de agua tratada o agua de lluvia, o bien la sustitución de agua del Cutzamala por agua de fuentes alternas. Además, debido a que Ciudad de México se abastece tanto de agua subterránea como de agua proveniente de otras cuencas hidrológicas, se añaden los costos ambientales (o externalidades, como especifican los autores en particular) del Sistema Cutzamala reportados por el Banco Mundial (2015), que también se puede extrapolar a otras cuencas. También se incluye el costo por gestión de residuos sólidos urbanos colectados en Ciudad de México.

a) El Sistema de Cuentas Nacionales del INEGI, presenta las Cuentas Económicas y Ecológicas de México que contiene los principales resultados de balances físicos de recursos naturales, variables monetarias y flujos físicos de recursos naturales, degradación ambiental y gastos de protección ambiental. El objetivo de dicho estudio es proveer

información en torno al PIB ecológico (PIBE), como un indicador del desarrollo sustentable. El PIBE se define como el PIB menos los costos por agotamiento de recursos no renovables menos los costos por contaminación del ambiente (INEGI, 2018b).

Su metodología se basa en el Marco Central de Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica (SCAE) auspiciado por instituciones como la ONU, Comisión Europea, FAO, OCDE, FMI, Banco Mundial. El SCAE es “un marco conceptual multipropósito que describe las interacciones entre la economía y el ambiente, así como las existencias de activos ambientales y sus variaciones; aplica la estructura y principios contables del Sistema de Cuenta Nacionales. El SCAE considera en términos físicos, a todos los recursos que proporcionan beneficios a la humanidad, y en términos monetarios, a aquellos que tienen valor económico (ONU *et al*, 2016).

El INEGI evalúa los costos por degradación del ambiente (emisiones al aire, agua residual sin tratar, degradación del suelo, residuos sólidos), agotamiento de recursos no renovables (recursos forestales, agua subterránea, hidrocarburos), y el gasto del sector público a la protección ambiental. Con esto se busca un indicador del daño ambiental y de los servicios ecosistémicos en valores monetarios. En esta contabilidad se usan diferentes técnicas como costos de tratamiento, costo de reposición, costo de reemplazo, costo social, cambio tecnológico, precios sombra, ingreso neto, manejo de residuos. Los indicadores obtenidos son relevantes para generar y avalar políticas públicas y representan un mínimo porcentaje del costo real de los servicios ecosistémicos (Guillén Martín, s.f.).

Las Bases de Datos de las Cuentas Económicas y Ecológicas presentan datos de 2003 hasta 2020 y se pueden consultar en las Bases de Datos del INEGI que están disponibles en: <https://www.inegi.org.mx/temas/ee/default.html#Tabulados>. La metodología se puede consultar tanto en su fuente de referencia, que es el SCAE (ONU *et al*, 2016), como en “Sistema de Cuentas Nacionales de México. Fuentes y metodologías. Año base 2013” (<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825097165>).

Para la valoración económica de las diferentes categorías de impacto, el INEGI utiliza los siguientes métodos de valoración (INEGI, 2018c; INEGI, 2018b):

Para el agotamiento de los yacimientos de petróleo, los costos se estiman con base al método de la “Renta Neta”; por el lado de los activos, se considera el impacto de la producción y los nuevos hallazgos de petróleo con la consecuente reducción de los activos ambientales”. En dicho estudio se considera que toda la producción de petróleo y gas natural consumido es agotamiento neto del recurso. Esto es, no se valora la pérdida de un recurso no renovable sino la pérdida de un ingreso. Para valorar adecuadamente el agotamiento del petróleo, se puede valorar el uso de una tecnología alterna proveniente de fuentes renovables, tanto para el combustible como para el empaque.

Para el costo de la contaminación del aire, se consideran únicamente los gases criterio, esto es, los que influyen en la salud humana, y que pueden provenir de fuentes móviles, fijas y de área. Estos son: óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx), óxidos de carbono

(COx), materia particulada de 2.5 micras (PM<sub>2.5</sub>), materia particulada de 10 micras (PM<sub>10</sub>), amoníaco (NH<sub>3</sub>) y compuestos orgánicos volátiles y totales. La institución se basó en información sobre Inventarios de Emisiones de la ZMVM, Balance Nacional de Energía, censos económicos, anuarios estadísticos de PEMEX, información de vuelos, de la SCT y de la industria automotriz, tomando en cuenta los factores de contaminación para fuentes móviles, programas como PROAIRE; también se consideró la emisión de gases provenientes de rellenos sanitarios y de las provenientes de incendios. Para estimar el costo, se forman paquetes tecnológicos para el control y abatimiento de la contaminación de fuentes fijas, móviles, y costos para el combate y prevención de los incendios forestales. Esta metodología, por lo tanto, considera los costos de reducción de la contaminación, pero no los costos de remediación de los daños ambientales ya ocasionados.

Para el caso de la contaminación del agua, se toma en cuenta diferentes tipos de contaminante y el costo del tratamiento de los efluentes, incluyendo agentes fisicoquímicos, materiales y suministros, energía, remuneraciones, entre otros. Este procedimiento toma en consideración la reducción de la contaminación del agua hasta ciertos límites permitidos, pero no considera la remediación de los daños ambientales ya ocasionados a lo largo del tiempo.

La valoración económica de la contaminación del suelo se refiere a los costos mínimos necesarios para revertir el daño ocasionado durante el desarrollo de las actividades económicas. Estos pueden incluir actividades como fertilización y compostaje del suelo, y obras civiles e hidráulicas para evitar la erosión. Estos costos no consideran el valor de las afectaciones pasadas ni acciones para prevenir o evitar la contaminación.

La contaminación generada por residuos sólidos en este caso se valora como los costos de gestión necesarios para tratar los residuos que no han recibido un tratamiento adecuado; en otras palabras, los costos de manejo, tratamiento y disposición final de residuos que no han sido colectados y se encuentran dispersos (costos de remediación). Se usa información de diversos análisis técnico-económicos y de gestión de residuos y análisis financieros de proyectos para la gestión de residuos diferentes estudios realizados para el Gobierno del Distrito Federal. En este caso, únicamente se consideran costos de gestión; un análisis más completo podría incluir el valor perdido del terreno usado para la gestión de los RSU, costos de reemplazo de materia prima de los envases para disminuir la cantidad de residuos, costos de remediación en los sitios de disposición final, y costos de los daños de los residuos que llegan a ríos o mares.

Debido a que el agua extraída del subsuelo no tiene un mercado, sino que únicamente se pagan concesiones, el precio se calcula como un precio sombra, con el que se simula un mercado sustituto. Con este método se equipara el valor total de la producción con el costo de oportunidad de los insumos. En México, el INEGI lo ha hecho con información de los organismos operadores de agua, con datos de censos y de cuentas nacionales, información sobre la recarga y extracción de agua para cada acuífero del país, con los que se obtiene un valor del agotamiento del agua subterránea general para todo el país (INEGI, 2018b). Este

valor, sin embargo, no considera los daños al ambiente ocasionados por la pérdida del recurso. Una forma de valuar la reparación del daño ambiental provocado por la extracción de agua subterránea del acuífero sería utilizar el costo de restauración o regeneración del acuífero; también sería interesante valuar económicamente los efectos de las subsidencias.

*Tabla 25 Costo del agotamiento de recursos naturales y de la contaminación para México en el período 2003-2018, en MMpesos<sup>35</sup> (pesos corrientes)*

Año	Costo del Agotamiento		Valor de la contaminación				
	Petróleo	Agua subterránea	RSU	Atmosférica fuentes móviles	Atmosférica fuentes fijas	Suelo	Agua
2003	84,604	13,186	27,586	319,384	759	49,239	13,186
2004	69,519	13,556	29,698	339,749	769	47,126	13,556
2005	76,978	16,288	31,679	355,578	829	50,222	16,288
2006	121,038	18,041	34,614	347,229	900	53,136	18,041
2007	88,626	17,946	36,760	364,852	961	62,750	17,946
2008	175,899	16,238	39,519	350,109	983	73,321	16,238
2009	150,931	19,889	43,268	353,260	1,003	62,363	19,889
2010	175,686	21,438	46,199	381,545	1,194	62,733	21,438
2011	179,253	24,045	49,242	397,430	1,253	68,860	24,045
2012	232,940	27,063	52,841	401,201	1,333	76,379	27,063
2013	232,988	29,534	55,377	408,582	1,403	81,079	29,534
2014	130,056	31,498	58,006	479,132	1,454	84,604	31,498
2015	80,395	32,388	61,427	519,090	1,541	93,220	32,388
2016	78,620	35,561	65,619	550,748	1,627	99,264	35,561
2017	62,632	39,094	70,970	601,892	1,856	107,652	39,094
2018	71,937	41,050	75,821	638,630	1,961	119,734	41,050

Fuente: INEGI, diversos años.

*Tabla 26 Magnitud del agotamiento de recursos naturales y de la contaminación para México, 2003-2018*

Año	Magnitud del Agotamiento		Magnitud de la contaminación				
	Petróleo	Agua Subterránea	RSU	Atmosférica fuentes móviles	Atmosférica fuentes fijas	Suelo	Agua
	MMb	MMm <sup>3</sup>	Ton	Ton CO <sub>2</sub> eq	Ton CO <sub>2</sub> eq	Hectáreas	MMm <sup>3</sup>
2003	1,587	5,703	37,981,439	11,498,528	2,109,553	74,770,989	8,690
2004	1,611	5,693	38,896,791	11,781,361	2,193,585	73,722,787	8,661
2005	1,604	5,693	39,656,981	11,981,756	2,193,912	74,648,777	11,350
2006	1,618	5,692	40,507,884	11,888,551	2,258,862	74,372,647	12,601
2007	1,603	5,917	41,468,956	12,093,907	2,296,143	75,326,714	13,049
2008	1,451	5,516	42,474,017	11,672,348	2,371,838	76,389,122	18,644
2009	1,378	5,459	43,488,182	11,429,497	2,418,091	75,275,770	18,557
2010	1,384	5,459	44,487,257	11,289,155	2,466,359	75,716,285	17,968
2011	1,358	5,635	45,288,982	11,850,041	2,581,276	75,941,493	18,884
2012	1,353	5,939	46,408,400	12,622,225	2,658,985	77,050,637	20,746
2013	1,333	5,985	47,418,321	12,865,783	2,633,288	76,477,700	21,091

<sup>35</sup> En este trabajo MM significa millones.

2014	1,291	5,984	48,404,762	12,778,224	2,553,157	77,175,555	20,991
2015	1,193	5,999	49,380,710	13,042,444	2,602,231	77,849,229	20,487
2016	1,113	5,999	50,358,952	13,065,382	2,614,320	78,426,044	20,530
2017	1,002	6,253	51,334,805	13,216,300	2,529,419	78,425,073	20,024
2018	925	6,268	51,841,641	13,519,815	2,491,278	78,620,460	21,515

Fuente: INEGI, diversos años.

El resumen de la información de las bases de datos de INEGI se presenta en la Tabla 25 y en la Tabla 26. Es interesante analizar el comportamiento de dicha información a través del tiempo. Sin embargo, para los cálculos únicamente se usarán los valores reportados para 2013.

b) El Banco Mundial (2015) hizo un diagnóstico integral para obtener una visión multidisciplinaria de la situación del Sistema Cutzamala, y en el que se sientan las bases para desarrollar un plan integral y sustentable de gestión. El estudio incluye una amplia evaluación técnica, social y económica. En el capítulo de “Aspectos económicos y financieros” se presenta el costo total del Sistema Cutzamala incluyendo tres aspectos: costo financiero, costo de oportunidad y costo de externalidades ambientales.

El costo financiero toma en cuenta los costos de suministro (que incluyen los costos de operación y mantenimiento, y mejoras a la infraestructura). El costo de oportunidad refleja la escasez y competencia por el uso del recurso, e incluye el valor del agua de uso agrícola (se usa el método de análisis residual con el cual se calcula la ganancia obtenida por volumen de agua suministrado), la acuicultura y el suministro público. El costo de las externalidades ambientales tienen que ver con la salud pública de las poblaciones afectadas por la extracción de agua hacia el Sistema Cutzamala y con los costos para evitar el daño ambiental; estas incluyen costos como restauración y conservación de bosques, mejoramiento de sistemas de agua potable y alcantarillado, tratamiento de aguas residuales y mejoramiento técnico en los distritos de riego. En la Tabla 27 se encuentra un resumen de los costos presentados.

Tabla 27 Costo económico total de Sistema Cutzamala para 2015

Sistema Cutzamala	Incluye	Pesos/m <sup>3</sup> (2015)
Costo de Suministro	Operación, mano de obra, mantenimiento, mejoras	10.0
Costo Económico no convencional	Costo de oportunidad (costo por impedir que otro sector use el agua)	5.69
Costos por trasvases	Trasvases entre cuencas	0.1
Costo de externalidades ambientales	Restauración y conservación de bosques, suelos y agua. Mejoramiento de suministro de agua potable. Tratamiento de aguas residuales. Modernización de distritos de riego.	1.0
<b>COSTO TOTAL</b>		<b>16.7</b>

Fuente: Banco Mundial (2015)

Además, este estudio considera que el agua entregada a Ciudad de México genera una externalidad positiva al evitar la sobreexplotación del acuífero, a pesar de los efectos negativos generados en las regiones proveedoras de agua. Las externalidades consideradas se relacionan con temas de salud pública y de mantenimiento del ecosistema y se calculan

con el método del costo de daño evitado. Se obtiene como resultado que el costo total del agua del Sistema Cutzamala es de \$16.7 pesos por metro cúbico, de los cuales \$1.0 pesos por metro cúbico corresponden a las externalidades ambientales. Es importante aclarar que el Banco Mundial considera que el costo de las externalidades está subestimado.

c) Para evaluar el costo de reposición del agua subterránea de Ciudad de México se evaluaron diferentes propuestas:

Elizondo (2020) hace un estudio en Baja California, un área de escasez semejante al de Ciudad de México; reporta un costo de reposición que va de los \$0.06104 a los \$0.44533 dólares/m<sup>3</sup> (valores de 2016)<sup>36</sup>. López-Morales *et al* (2017c) estudia la sustitución del agua subterránea por seis acuíferos alternos; el costo de reemplazo que encuentran varían entre \$0.65 y \$0.82 dólares/m<sup>3</sup> (valores de 2016)<sup>37</sup>. Gómez Reyes (2013) presenta un estudio de factibilidad técnico-económico para el uso de agua de lluvia para la recarga y recuperación del acuífero de la Zona Metropolitana de Ciudad de México, y calcula un costo promedio para Ciudad de México de \$11.9 pesos/m<sup>3</sup>.

Se elige como mejor opción el valor de este último estudio, por ser más adecuado para lograr un manejo sustentable del agua, porque no sólo toma en consideración el abastecimiento de agua a la población, sino que también considera la recuperación del acuífero y se disminuyen los costos por el bombeo del agua de lluvia. En este caso, no existen errores por temporalidad y por espacialidad.

d) Para este trabajo se usa el valor que presenta Vogtlander *et al* (2010) para el agotamiento del petróleo de \$ 0.7 euros/kg a valores de 2007, basado en el supuesto de una sustitución del petróleo por biomasa; este valor puede ser mejor porque no depende de la volatilidad de los precios del mercado de hidrocarburos.

e) De acuerdo al Proyecto de Presupuesto de Egresos del Distrito Federal para el ejercicio fiscal 2013 (GDF, 2012 consultado el 26/5/2022), se aprobaron \$2,026,496,657 pesos para el manejo 12500 toneladas diarias de residuos sólidos, incluyendo colecta y traslado de residuos sólidos. Este es el costo de eliminación de la contaminación en la ciudad; sin embargo, no se está considerando el costo, pasado, actual y futuro, de la degradación ambiental que se tiene en el lugar mismo del sitio de disposición final.

## 2. ACTUALIZACIÓN DE COSTOS A VALORES CONSTANTES

En esta sección se presenta la compilación de costos ambientales necesarios para las secciones posteriores, así como los índices económicos requeridos para hacer los ajustes por temporalidad (año) y espacialidad (país). También se realiza, en los casos que así se requiera, el cálculo por unidad de masa.

---

<sup>36</sup> Equivalente a \$1.038-7.57 pesos/m<sup>3</sup>

<sup>37</sup> Equivalente a \$11.05-13.9 pesos/m<sup>3</sup>

El año de referencia elegido para este análisis es 2013.

Como se comentó anteriormente, en este trabajo se usan los valores de otros trabajos, y esto es una Transferencia de Beneficios. La transferencia de beneficios tiene cuatro variantes: del valor unitario medio, del valor medio ajustado (igual que el anterior pero haciendo un ajuste o selección en la muestra), de la función de valor y de meta-análisis. Cuando se tienen varias fuentes posibles se puede optar por: elegir el más confiable, elegir el que tenga el valor de la mediana, calcular el intervalo de confianza y desviación estándar de los estudios elegidos, o bien, crear una función a partir de los resultados de los estudios (Cristeche et al, 2008, De Bruyn et al, 2010a).

De Bruyn et al (2010), en Anexo del libro Manual de Precios Sombra, publicado por CE Delf, explica que en el acercamiento de transferencia de valor se supone que el bienestar promedio individual no varía y únicamente cambia la calidad de servicio ambiental. No se hacen ajustes por ningún tipo de característica; el valor se transfiere directamente.

En el acercamiento de valor medio ajustado se toma en cuenta el nivel de ingresos o el costo de vida, y es el que puede usarse para transferencia de beneficios entre países (esto es, transferencia espacial). Se puede usar una ecuación del siguiente tipo  $P_2 = P_1 \left( \frac{Y_2}{Y_1} \right)^\beta$ , donde P es el precio (o disposición a pagar por un servicio), Y es el nivel de ingreso del país (o PIB ajustado por Paridad de Poder de Compra) y  $\beta$  es la elasticidad de la demanda del bien ambiental en función del ingreso y puede variar entre 0.4 y 0.85<sup>38</sup>.

La transferencia de la función de valor requiere información de algún estudio cuyo resultado se presente en forma de ecuación, y datos empíricos propios para poder introducirlos en ella. En el meta-análisis se combinan varios estudios para obtener una función de valor en común; esta función puede usarse junto con datos empíricos, para obtener un valor ajustado.

La transferencia de valor unitario ajustada por nivel de ingreso se recomienda por su simplicidad y transparencia; este método es tan confiable como otros procedimientos más complejos como la transferencia de función de valor o meta-análisis (De Bruyn et al, 2010a).

---

<sup>38</sup> La elasticidad de la demanda de petróleo respecto al ingreso varía dependiendo del país, período y de acuerdo a la metodología usada (Parker, 2010 consultado el 20/5/2022). Pindyck et al (2018) explican que las elasticidades ingreso demanda a corto plazo de la gasolina son menores que las de largo plazo, y éstas últimas tienden a uno. Tsirimokos (2011) explica que para el petróleo la elasticidad de la demanda respecto al precio es altamente inelástica, tanto a corto como a largo plazo mientras que la elasticidad de la demanda respecto al ingreso a largo plazo tiende ser elástica, con valores entre 0.73 y 2.4. Este autor menciona diferentes investigaciones que sitúan la elasticidad ingreso demanda de largo plazo entre 0.89 y 0.98. Parker (2010), sin embargo, sitúa la elasticidad ingreso demanda de largo plazo de países desarrollados de alrededor de 0.4, mientras que para otros países alrededor de 0.35. Bruyn et al (2010a) explica que para bienes ambientales dicho factor varía entre 0.4 y 0.85; en sus cálculos usa 0.85 puesto que en los Proyectos NEEDS (National Economic, Environmental and Development Study for Climate Change Project, de la United Nations) es el factor que se considera adecuado.

De acuerdo a De Bruyn et al (2010a), para transferir valores con ajuste espacial (entre países) y con ajuste temporal (diferentes años), se debe realizar primero la conversión a la moneda del segundo país usando PPC en el mismo año del estudio, y posteriormente se hace el ajuste con el IPC del segundo país para actualizar valores al años de estudio.

Sin embargo, la misma CE Delf publica en 2018 el Manual de Precios Ambientales versión EU28 (De Bruym et al, 2018) donde explica un cambio en el método de cálculo de los precios abandonando los precios sombra u adoptando esta nueva versión. En ella, es de notarse, no se hace referencia a ningún cálculo de ajuste para realizar la Transferencia de Valor.

De hecho, se argumenta que los Eco-costos (calculados como costos de prevención) se determinan de acuerdo a la mejor práctica que se debe realizar para prevenir la contaminación ambiental, y que deben aplicarse por igual en todo el mundo, sin importar las leyes ambientales o la situación económica particular, con lo cual se evitaría “la exportación de problemas ambientales por razones económicas”; esto es, debería hacerse ninguna adaptación a los precios de costos ambientales por ser un país fuera de la Unión Europea (Sustainability Impact Metrics et al (s.f.), consultada el 18/05/2022).

Por otra parte, en el trabajo de Pirmana et al (2021) se calcula el costo de la degradación ambiental para Indonesia. Los autores usan varias fuentes para los precios, incluyendo el Manual de Precios Ambientales EU28. Para hacer la conversión monetaria, los autores primero ajustan el costo ambiental al año requerido por medio del deflactor del PIB de la Unión Europea y luego hacen cambio secuencial con Paridad de Poder de Compra (PPC) a EUA y luego Indonesia. No usa el tipo de cambio de mercado, pues el autor considera que con este se subestiman los costos de daño.

En conclusión, aunque hay diferentes versiones de cómo hacer los ajustes a los costos ambientales por temporalidad y espacialidad, no existe una directriz única, y la elección del método se deja a criterio de cada investigador. En este estudio, se va a optar por el ajust sugerido por De Bruyn et al (2010a), eso es, hacer primero el ajuste espacial con PPC y luego el ajuste temporal con IPC.

Todos los indicadores usados para realizar cálculos en las siguientes secciones, como valores de PIB, Índice Nacional de Precios al Consumidor (INPC), Paridad de Poder de Compra (PPC) y tipos de cambio utilizadas, se encuentran resumidos en la Tabla 43, Anexo II.

- a) La información del INEGI correspondiente al año 2013, no requieren actualización temporal porque los años de referencia son los mismos. El costo unitario de las categorías de impacto se obtiene multiplicando los costos cada categoría de impacto (Tabla 25) por la magnitud reportada de cada categoría de impacto (Tabla 26), como se muestra en la siguiente ecuación, cuyos resultados se encuentra en la Tabla 28. En el Anexo II de este trabajo se puede encontrar la Tabla 45 que muestra los resultados para todo el período de 2003-2018.

$$\text{Costo ambiental unitario} = \text{Costo ambiental} * \frac{1}{\text{magnitud}}$$

Tabla 28 Costo ambiental unitario del agotamiento y de la contaminación para México, valores de 2013.

Año	Costo del Agotamiento		Costo de la contaminación				
	Petróleo	Agua subterránea	RSU	Atmosférica fuentes móviles	Atmosférica fuentes fijas	Suelo	Agua
	Pesos/barril	Pesos/m3	Pesos/kg	Pesos/kg CO2eq	Pesos/kg CO2eq	Pesos/km <sup>2</sup>	Pesos/m <sup>3</sup>
2013	174.785	4.935	1.168	31.7573	0.53262	1060.161	1.4003

Fuente: INEGI, diversos años.

- b) También se utiliza en una sección posterior, específicamente la información de los costos de agotamiento de petróleo del período 2003-2018. Para hacer las actualizaciones no se utiliza el INPC, porque el agotamiento de petróleo no pertenece a la canasta de productos de consumo con la que se calcula ese índice. Una forma más adecuada es calcularlo como porcentaje del PIB (de hecho el agotamiento de petróleo forma parte del PIBE que la misma institución calcula), y usar ese mismo porcentaje con el PIB de ese mismo año actualizado a valores de 2013 (información proporcionada por el INEGI). Los valores de agotamiento de petróleo para cada año son los mostrados en la Tabla 25, y los valores del PIB a valores corrientes y constantes de 2013 se encuentran en la Tabla 43. Las actualizaciones se hacen de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Costo agotamiento petróleo 2013} = \text{Costo agotamiento petróleo } i * \frac{\text{PIB } 2013}{\text{PIB } i}$$

Al igual que en el inciso anterior, el costo unitario de las categorías de impacto se obtiene multiplicando los costos cada categoría de impacto (Tabla 25) por la magnitud reportada de cada categoría de impacto (Tabla 26). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 44 del Anexo II<sup>39</sup>.

- c) Los valores reportados por el Banco Mundial para el Sistema Cutzamala (ver Tabla 27) requieren actualización de acuerdo al INPC. En la Tabla 29 se muestran los valores actualizados de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Precio}_{2013} = \text{Precio}_{2015} \frac{\text{INPC}_{2013}}{\text{INPC}_{2015}}$$

Tabla 29 Costos económico total actualizados del Sistema Cutzamala

	Pesos/m <sup>3</sup> (2015)	Pesos/m <sup>3</sup> (2013)
Costo de Suministro	10.0	9.359
Costo total externalidades	6.69	6.262
Costo Económico no convencional	5.69	5.326
Costos por trasvases	0.1	0.0936

<sup>39</sup> Por considerarse de posible interés, en el Anexo II al final de la tesis, se incluyen los resultados de este mismo procedimiento para todos los años y para las demás categorías de impacto.

Costo de Externalidades ambientales	1.0	0.9359
COSTO TOTAL	16.7	15.631

Fuente: Banco Mundial, 2015.

En este caso, el costo de las externalidades ambientales derivadas del uso de agua superficial en el Sistema Cutzamala es \$0.9359 pesos/m<sup>3</sup>.

- d) Los valores reportados por Gómez Reyes (2013) no requieren conversión. Además, el estudio se basa en la recuperación de las aguas subterráneas de Ciudad de México, por lo que este valor se considera el más adecuado en cuanto a la sustentabilidad del recurso hídrico, además de que se evitan errores por temporalidad y por espacialidad. Por lo tanto, el costo de reposición de agua subterránea considerado en este trabajo será \$11.9 pesos/m<sup>3</sup>.
- e) Respecto al Eco-costo de sustitución de petróleo reportado por Vogtlander et al (2010), que es \$0.7 euros/kg en 2007, se actualiza de la siguiente forma, conforme a lo explicado anteriormente:

$$\frac{\$0.7 \text{ euro de 2007}}{\text{kg}} * \frac{7.37(\text{pppmex2007})}{0.79 (\text{pppeu2007})} * \frac{82.0364(\text{inpcmex2013})}{63.6679(\text{inpcmex2007})} = \$8.4144 \frac{\text{peso de 2013}}{\text{kg}}$$

- f) Respecto al gasto por manejo de RSU, el Proyecto de Presupuesto de Egresos del Distrito Federal Ejercicio Fiscal 2013 (GDF, 2012) calcula 12500<sup>40</sup> toneladas diarias, que corresponden a 4,562,500 toneladas anuales; para esto se asignaron \$2,026,496,657 pesos. Por lo que el costo unitario de manejo de RSU es:

$$\frac{\$2026496657 \text{ pesos2013}}{4562500 \text{ ton}} = 444.16 \frac{\text{pesos 2013}}{\text{ton}} = \$0.44416 \frac{\text{pesos 2013}}{\text{kg}}$$

<sup>40</sup> Cabe señalar que la cifra real reportada para ese año en el Inventario de Residuos Sólidos (SMAGDF, 2014) es de 12816 toneladas diarias, que corresponde a 4,677,840 toneladas anuales.

## D. CÁLCULO DEL COSTO AMBIENTAL POR UNIDAD FUNCIONAL PARA CADA CATEGORÍA DE IMPACTO

A continuación se presentan los cálculos para encontrar los costos ambientales de cada categoría de impacto para 1 botella con valores de 2013<sup>41</sup>.

### 1. AGOTAMIENTO DE PETRÓLEO

De acuerdo a los datos de la Tabla 28 y Tabla 45, el valor por unidad de masa del agotamiento del petróleo ha fluctuado entre \$51-175 pesos por barril (valores constantes de 2013), con un promedio de \$102.46 pesos/barril. El valor para el año 2013 es \$174.785 pesos/barril.

Considerando que por cada litro de agua embotellada se usan en promedio 0.0010122 barriles de petróleo (Tabla 13), el cálculo para una botella es como sigue:

$$\$174.785 \frac{\text{pesos}}{\text{barril de petróleo}} * 0.0010122 \frac{\text{barril de petróleo}}{1 \text{ botella}} = \$0.1769 \frac{\text{pesos}}{\text{botella}}$$

Siguiendo la misma lógica se pueden construir la Tabla 30 con los valores máximo y mínimo.

*Tabla 30 Costo del agotamiento de petróleo por botella, información INEGI*

Consumo de petróleo (barriles/botella)	Valor del agotamiento del petróleo por 1 botella (pesos/botella)
0.000577 (min)	\$0.10085
0.0010122 (promedio)	\$0.1769
0.00218 (max)	\$0.3810

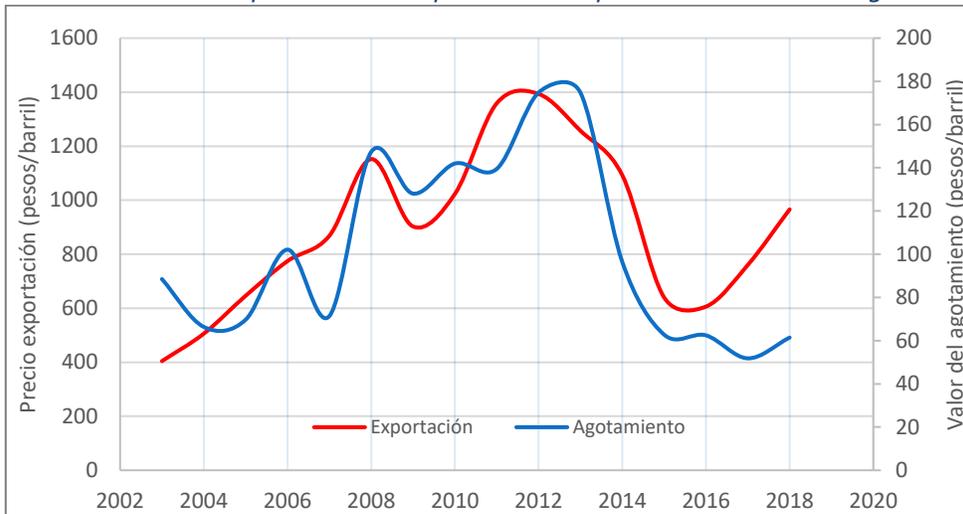
De acuerdo con lo explicado en secciones anteriores, el valor del agotamiento del petróleo calculado por el INEGI con el método de la Renta Neta representa el ingreso monetario que se perderá en un futuro, y depende directamente del precio de venta de éste. En la Ilustración 10 se muestra gráficamente la dependencia del valor de agotamiento con el precio promedio exportación del petróleo. De hecho, puesto que el precio comercial depende de múltiples factores, incluyendo las crisis económicas y especulación mundial, cuando se disminuye la venta de petróleo también se reduce el valor del agotamiento del recurso, lo que es contra-intuitivo.

El valor del agotamiento debería mostrar una tendencia a la alza, puesto que es un recurso no renovable. Esto significa que el agotamiento no se está valorando de acuerdo a su escasez, sino como función de la especulación de los mercados de petróleo internacionales. Por lo que usar este valor no es la mejor opción.

---

<sup>41</sup> Por si es de interés, en el Anexo III, Tabla 46 se presentan los valores para los años 2013-2018, incluida una gráfica (Ilustración 11) con valores de las categorías de impacto agregados.

Ilustración 10 Precio promedio de exportación del petróleo vs. costo del agotamiento del petróleo



Fuente: INEGI, Anuario estadístico de PEMEX (PEMEX, 2019), tipo de cambio de Banco de México ([www.banxico.org.mx](http://www.banxico.org.mx) consultado el 20/5/2020)

Para encontrar un valor más representativo de la escasez del petróleo, existe el método de reposición; esto es, el costo de sustitución de los servicios prestados por el petróleo por medio de una tecnología alterna. En este caso, el petróleo puede, hipotéticamente, ser sustituido por energía renovable, ya sea en su uso como energético o como materia prima.

De hecho Vögtlander et al (2010) explican que, debido a la volatilidad e impredecibilidad del precio del crudo en los últimos años, para el caso específico de los plásticos se sugiere utilizar el costo ambiental basado en la biomasa. Dichos autores presentan un eco-costo basado en el supuesto de una sustitución del petróleo por biomasa de \$ 0.7 euros/kg a valores de 2007, que corresponde, según cálculos en una sección anterior, a un eco-costo de \$8.4144 pesos/kg.

Si se toma en cuenta una densidad de 126.4 kg/barril de petróleo (BP, 2014), se obtiene un costo por agotamiento del petróleo de \$1063.583 pesos/barril de petróleo, valor 6 veces mayor que el reportado por el INEGI (\$174.785). Esta fuente de información es un mejor indicador del valor de la escasez del petróleo. El costo por agotamiento de petróleo para la unidad funcional se obtiene de acuerdo a:

$$\$1063.583 \frac{\text{pesos}}{\text{barril de petróleo}} * 0.0010122 \frac{\text{barril de petróleo}}{1 \text{ botella}} = \$1.0764 \frac{\text{pesos}}{1 \text{ botella}}$$

Se puede seguir el mismo procedimiento con los valores máximo y mínimo de consumo de energía de proceso, y así construir la Tabla 31.

Tabla 31 Costo del agotamiento de petróleo por botella, valores de Vögtlander et al (2010)

Consumo de petróleo (barriles/botella)	Valor del agotamiento del petróleo por cada litro de agua embotellada (pesos/botella)
0.000577 (min)	\$0.6137
0.0010122 (promedio)	\$1.0764
0.00218 (max)	\$2.3186

En este caso, el costo mínimo, promedio y máximo del agotamiento de petróleo debido a la producción de cada botella de agua de 1L son \$0.6137, \$1.0764 y \$2.3186 pesos/botella, respectivamente.

## 2. AGOTAMIENTO DEL AGUA

### COSTO DEL AGOTAMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

De los cálculos presentados en la Tabla 28 se obtiene que el costo de agotamiento del agua subterránea es \$4.935 pesos/m<sup>3</sup>. De hecho, de acuerdo a los valores presentados en el Anexo I, se observa que en 15 años el valor del agotamiento del agua subterránea en el país ha aumentado el 70%, al pasar de \$3.84 a \$6.55 pesos/m<sup>3</sup>, con un valor promedio de \$4.644 pesos/m<sup>3</sup>. El valor del agotamiento del agua subterránea tiene que ver con su calidad de recurso no renovable, y fue calculado por el INEGI con el método de los precios sombra y muestra una tendencia creciente con el tiempo, que es acorde al aumento de la escasez.

Tomando en cuenta que el volumen de agua subterránea usada para cada botella de agua es 0.8415 L (información de la Tabla 16), se obtiene el costo por unidad de masa por agotamiento:

$$\$4.935 \frac{\text{pesos}}{\text{m}^3 \text{ de agua subt}} * 0.8415 \frac{\text{L agua subt}}{1 \text{ botella}} * \frac{1\text{m}^3}{1000\text{L}} = \$0.00415 \frac{\text{pesos}}{1 \text{ botella}}$$

Sin embargo, llama la atención el valor tan bajo del valor del agotamiento del agua subterránea. Esto puede deberse, seguramente, a que los valores no son específicos para Ciudad de México. En otras palabras, puesto que el valor del agotamiento es un valor promedio para el país, es de esperar que el valor por agotamiento adecuado para Ciudad de México sea mucho mayor, debido a que sus acuíferos están sobreexplotados. Sería interesante encontrar el precio sombra para las diferentes circunstancias de cada acuífero de la República Mexicana.

Para este trabajo, en vez del cálculo del INEGI se toma el valor del cálculo hecho por Gómez Reyes (2013); el autor calcula el costo de reposición del agua subterránea específicamente para Ciudad de México. La ventaja de su propuesta es que se aprovecha un insumo gratuito que es el agua de lluvia, sin perjudicar otras cuencas o acuíferos; además de que con la implementación del sistema propuesto se generaría un ahorro de costos de bombeo, debido a la disminución de agua pluvial que iría hacia el drenaje y luego hacia fuera de la ciudad. Este puede considerarse un costo del agua subterránea más adecuado, porque promueve la recuperación y sustentabilidad del acuífero. El autor calcula un costo promedio para Ciudad de México de \$11.9 pesos/m<sup>3</sup> y este puede considerarse el costo de la escasez de agua subterránea de la ciudad.

$$\$11.9 \frac{\text{pesos}}{\text{m}^3 \text{ de agua subt}} * 0.8415 \frac{\text{L agua subt}}{1 \text{ botella}} * \frac{1\text{m}^3}{1000\text{L}} = \$0.01001 \frac{\text{pesos}}{1 \text{ botella}}$$

En este caso, el costo por agotamiento de cada botella de 1L de agua será de \$0.01 pesos/botella; ese valor es 2.6 veces mayor que es calculado por el INEGI como promedio para el país. Este valor se usa para calcular los valores de agotamiento de agua subterránea por botella.

#### COSTO AMBIENTAL DEL AGUA SUPERFICIAL PROVENIENTE DEL SISTEMA CUTZAMALA

En primer lugar, es necesario decir que este costo económico total del agua superficial proveniente del Sistema Cutzamala puede considerarse como el costo que se tiene que pagar actualmente por el consumo irracional de agua subterránea de Ciudad de México por generaciones pasadas. Este costo lo paga la población de Ciudad de México a través de los elevados costos del agua, y también lo pagan las poblaciones y ecosistemas que se ven privadas del agua que naturalmente podrían disponer.

Aunque como ya se explicó, el agua superficial se considera renovable, en este apartado se tiene en consideración que el agua superficial de abastecimiento público de Ciudad de México proviene en un 31.7% del Cutzamala, 8.1% del Acuífero del Alto Lerma, 15.5% del Sistema Plan de acción inmediata, 2.1% del Sistema Chiconautla, según el Diario Oficial de la Federación (DOF, 2016) (Ver Tabla 14), y esto genera costos ambientales, por los daños y perjuicios que sufren las poblaciones y ambiente que se ven privadas del suministro natural de agua y por los costos ambientales generados por el bombeo, construcción de la infraestructura.

Por lo tanto, para incorporar este rubro se usa el estudio del Banco Mundial (2015) "Cutzamala. Diagnóstico Integral". En dicho estudio, se incorporan los costos de suministro (que incluyen los costos de operación y mantenimiento y los de costo de capital); el costo de oportunidad (que considera el costo por no usar el agua para fines agrícolas, acuacultura o abastecimiento de las poblaciones); las externalidades económicas (costos o beneficios de las sub-cuencas por los trasvases de agua); y las externalidades ambientales (que consideran el costo del daño ambiental debido a la operación del sistema Cutzamala, e incluye restauración y conservación de bosques, suelos y agua; mejoramiento de servicios de agua potable y alcantarillado, tratamiento de aguas residuales; modernización de distritos de riego).

Por simplicidad, se puede considerar que estos costos son de tipo general y que siempre ocurren, se va a considerar que estos costos pueden extenderse para las otras cuencas que abastecen el sistema de aguas de Ciudad de México.

Como se observa en la Tabla 29, el costo de las externalidades ambientales es \$0.9359 pesos/m<sup>3</sup> y equivale a un 10% del costo de operación, mano de obra, mantenimiento e inversiones. Tomando en cuenta que el volumen promedio de agua superficial usada para cada botella de agua es 0.6465 L (información de la Tabla 17), el resultado del costo por unidad funcional es:

$$\$0.9359 \frac{\text{pesos}}{\text{m}^3 \text{ de agua sup}} * \frac{1\text{m}^3}{1000\text{L}} * 0.6465 \frac{\text{L agua sup}}{1 \text{ botella}} = \$0.000605 \frac{\text{pesos}}{1 \text{ botella}}$$

De igual forma se pueden calcular los costos máximo y mínimo, para generar la siguiente tabla:

*Tabla 32 Costo ambiental del agua superficial por botella*

Consumo de agua superficial (L/botella)	Costo ambiental del agua superficial (pesos/botella)
0.4085 (min)	\$0.00038
0.6465 (promedio)	\$0.000605
1.1125 (max)	\$0.00104

El costo ambiental relacionado con en el envío de agua superficial hacia la Ciudad de México varía entre \$0.00038 y \$0.00104 pesos por 1 botella, siendo el promedio \$0.000605 pesos por botella.

Con la suma de los dos resultados anteriores se obtiene el costo ambiental total promedio por cada litro de agua embotellada, por el uso de agua superficial y subterránea, como se muestra en el cálculo siguiente. Los resultados para los valores promedio, mínimo y máximo se muestran en la Tabla 33.

$$\$0.01001 \frac{\text{pesos}}{1 \text{ botella}} + \$0.000605 \frac{\text{pesos}}{1 \text{ botella}} = \$0.01062 \frac{\text{pesos}}{1 \text{ botella}}$$

*Tabla 33 Costo ambiental del agua superficial y subterránea por botella*

Costo agotamiento del agua subterránea (pesos/botella)	Costo ambiental de agua superficial (pesos/botella)	Costo ambiental total (pesos/botella)
\$0.01001	\$0.00038 (min)	\$0.01039
\$0.01001	\$0.000605 (promedio)	\$0.01062
\$0.01001	\$0.00104 (max)	\$0.01106

Es interesante observar que el costo ambiental total es mayoritariamente debido al costo de agotamiento del agua subterránea, siendo su contribución de poco menos del 80% hasta el 96%.

### 3. COSTO DEL DAÑO POR GENERACIÓN DE RESIDUOS

Para el costo ambiental total debido a la generación y manejo de residuos sólidos urbanos se usan el costo de remediación reportado por el INEGI, se refiere únicamente al costo de disponer adecuadamente todos los residuos que están dispersos inadecuadamente; y los costos por gestión de los residuos sólidos urbanos, que es el costo que del Gobierno de Ciudad de México por el manejo adecuado de los residuos.

Aunque son extremadamente importantes los daños causados por los desechos plásticos a los cuerpos de agua, en este trabajo no se toman en cuenta por dos razones: en primer lugar, no existe mar cercano a la ciudad y aunque se podría considerar que existen algunos cuerpos de agua en la ciudad, estos son mínimos. En segundo lugar, y de acuerdo a lo reportado por ECOCE (como ya explicado en una sección anterior), en Ciudad de México la

recolección de PET alcanza porcentajes muy altos, por lo que lo poco que puede llegar a alguno de los pocos cuerpos de agua que quedan, es mínimo.

#### COSTO DE REMEDIACIÓN POR RESIDUOS SÓLIDOS DISPERSOS

Como se mencionó anteriormente, el costo de remediación definido por el INEGI “se refiere a los costos de tratamiento, manejo y disposición final de los residuos que no reciben un tratamiento adecuado” (INEGI, 2018b). De acuerdo a la Tabla 45 del Anexo II, el costo promedio de remediación de los residuos sólidos es de \$1.1586 pesos/kg de residuo, y varía entre \$1.131 y \$1.174 a lo largo del período estudiado. El costo reportado para 2013 es \$1.168 pesos/kg (Tabla 28).

La cantidad de residuos sólidos promedio generados por cada botella de agua que no reciben un tratamiento adecuado se determinan por el resultado de los ACV (ver Tabla 19).

$$\frac{\$1.168 \text{ pesos}}{\text{kg residuos dispersos}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} * \frac{5.033 \text{ g}}{1 \text{ botella}} = \$0.005879 \frac{\text{pesos}}{1 \text{ botella}}$$

Los mismos cálculos se pueden repetir para las cantidades máximas y mínimas de residuos dispersos en el ambiente (de la Tabla 19), con lo cual se construye la Tabla 34.

*Tabla 34 Costos de remediación por los residuos sólidos urbanos totales dispersos en ambiente*

	Residuos Sólidos Urbanos dispersos en el ambiente (g/botella)	Costo de remediación por Residuos Sólidos Urbanos totales dispersos en ambiente (pesos/botella)
Máximo	6.891	\$0.00805
Promedio	5.0325	\$0.00588
Mínimo	2.691	\$0.00314

En promedio, el costo total promedio por cada botella para la remediación de los residuos sólidos no colectados es \$0.00588 pesos/botella, y varía entre \$0.00314 y \$0.00805 pesos por botella.

#### COSTO POR GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

En este apartado se calcula el costo por gestión de los residuos sólidos por parte del gobierno de Ciudad de México, esto es, el costo para disminuir la contaminación en la ciudad provocada por los residuos sólidos generados por la misma ciudad, por lo que el costo de gestión de residuos puede considerarse un costo para evitar la contaminación ambiental. En una sección anterior se calculó el costo por gestión de RSU reportado por el Gobierno del DF, que es \$0.44416 pesos/kg (valores de 2013).

De acuerdo a la Tabla 19, la cantidad de RSU recolectados es, en promedio, 38.1175 g/botella, por lo que el costo es \$0.0169 pesos/botella, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\$0.44416 \frac{\text{pesos}}{\text{kg RSU}} * \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} * \frac{38.1175\text{g}}{\text{botella}} * = \$ 0.0169 \frac{\text{pesos}}{\text{botella}}$$

En la Tabla 35 se muestra el resultado de los mismos cálculos hechos para las cantidades máxima y mínima de residuos que se exponen en la Tabla 19.

*Tabla 35 Costos de gestión de residuos sólidos urbanos*

	Residuos Sólidos Urbanos recolectados (g/botella)	Costo por gestión de Residuos sólidos urbanos totales (pesos/botella)
Máximo	45.109	\$0.02
Promedio	38.1175	\$0.0169
Mínimo	29.309	\$0.013

El costo total promedio por gestión los residuos sólidos generados en el ciclo de vida de cada botella es \$0.0169 pesos/botella, variando entre \$0.013 - \$0.02 pesos/botella.

#### COSTO AMBIENTAL TOTAL POR GESTIÓN DE RSU Y RESIDUOS DISPERSOS

El costo total por la generación de residuos de botellas de PET es la suma de los dos costos anteriores, residuos sólidos urbanos y residuos dispersos, y los resultados se muestran en la Tabla 36.

*Tabla 36 Costo ambiental total por residuos sólidos colectados y dispersos*

	Costo de remediación por Residuos sólidos urbanos totales dispersos en ambiente (pesos/botella)	Costo por gestión de Residuos sólidos urbanos colectados (pesos/botella)	Costo ambiental Total (pesos/botella)
Máximo	\$0.00805	\$0.02	\$0.02805
Promedio	\$0.00588	\$0.0169	\$0.0228
Mínimo	\$0.00314	\$0.013	\$0.0164

Esto es, el costo ambiental total por residuos de todo el ciclo de vida del agua embotellada es, en promedio, \$0.0228 pesos/botella, con el valor máximo de \$0.02805 pesos/botella y el valor mínimo de \$0.0164 pesos/botella.

De este total, entre el 71.3 y 79.8% corresponde al costo de la gestión y entre el 19.2 y 28.7% corresponde al costo por remediación.

Es importante recordar que la cantidad de residuos dispersos en la atmósfera es de un orden de magnitud menor que los que se recolectan. Sin embargo, el costo unitario por manejo de residuos dispersos en el ambiente es 2.6 veces mayor:

$$\frac{\$1.168 \text{ pesos/kg}}{\$0.44416 \text{ pesos/kg}} = 2.6$$

Esta comparación es importante porque se puede constatar que es mucho más barato manejar y disponer correctamente un kilogramo de residuo, que el manejo de la misma cantidad de residuos dispersos en el ambiente.

#### 4. COSTO AMBIENTAL DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

Para obtener el costo promedio de la contaminación atmosférica generada por la producción de agua embotellada, se toman en cuenta los resultados mostrados en la Tabla 12, en la que se observa que, en promedio por cada litro de agua embotellada se produce un promedio de 0.2393 kg de CO<sub>2</sub>eq (con un máximo de 0.645 y un mínimo de 0.075 kgCO<sub>2</sub>) a lo largo del ciclo de vida del agua embotellada, tanto de fuentes fijas como de fuentes móviles. Este total se puede subdividir en fuentes fijas y fuentes móviles. Como se explicó en una sección anterior (ver pág. 70), la contribución diferenciada del potencial de calentamiento global según fuentes fijas y fuentes móviles se hace de acuerdo a los resultados obtenidos por Dettore (2009); en los resultados se observa que las fuentes fijas contribuyen con un 80.69% y las fuentes móviles contribuyen con un 19.3% del total de las emisiones a la atmósfera.

Entonces, las fuentes fijas generan:

$$\frac{0.2393 \text{ kg CO}_2\text{eq}}{\text{botella}} * 80.69\% = \frac{0.1931 \text{ kgCO}_2\text{eq}}{\text{botella}}$$

Y las fuentes móviles generan:

$$\frac{0.2393 \text{ kg CO}_2\text{eq}}{\text{botella}} * 19.3\% = \frac{0.0462 \text{ kgCO}_2\text{eq}}{\text{botella}}$$

En la Tabla 28 se muestran los costos de la contaminación atmosférica proveniente de fuentes móviles (\$31.7573 pesos/kgCO<sub>2</sub>eq) y de fuentes fijas (\$0.53262 pesos/kgCO<sub>2</sub> eq), por lo que los costos promedio de contaminación del aire para fuentes fijas y móviles son:

$$\text{Para fuentes fijas: } \$0.53262 \frac{\text{pesos}}{\text{kgCO}_2\text{eq}} * 0.1931 \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{botella}} = \$ 0.10285 \frac{\text{pesos}}{\text{botella}}$$

$$\text{Para fuentes móviles: } \$31.7573 \frac{\text{pesos}}{\text{kgCO}_2\text{eq}} * 0.0462 \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{botella}} = \$ 1.4667 \frac{\text{pesos}}{\text{botella}}$$

$$\text{Costo total contaminación atmosférica: } \$0.10285 + \$1.4667 = \$ 1.569 \frac{\text{pesos}}{\text{botella}}$$

Siguiendo la misma metodología se pueden obtener los costos máximos y mínimos por contaminación del aire, que se muestran en la Tabla 37.

Entonces, el costo promedio de las emisiones atmosféricas generadas en la producción de 1L de agua embotellada, proveniente tanto de fuentes fijas como de fuentes móviles es, en promedio, \$1.57 pesos, pudiendo oscilar entre \$0.492 y \$4.231 pesos/botella.

*Tabla 37 Costo total de la contaminación atmosférica, por botella.*

Potencial de calentamiento global (kgCO <sub>2</sub> eq/ botella)			Costo por contaminación del aire (pesos/botella)		
	Fuentes fijas (80.69%)	Fuentes móviles (19.3%)	Fuentes fijas	Fuentes móviles	Total
Máximo = 0.645	0.5205	0.1245	0.2772	3.9533	4.231
Promedio = 0.2393	0.1931	0.0462	0.1028	1.4677	1.569
Mínimo = 0.075	0.0605	0.0145	0.0322	0.4597	0.492

Este costo de emisiones se debe mayoritariamente (más del 93%) a las fuentes móviles, esto es, al transporte, y la gran diferencia entre valores máximo y mínimo se debe a las diferentes distancias usadas por los autores.

## 5. COSTO DE LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA

En la Tabla 28 se muestra el costo de la contaminación del agua para el año 2013, que es \$1.4003 pesos/m<sup>3</sup>. Dichos costos varían entre \$1.06-2.52 pesos/m<sup>3</sup> en el período 2003-2018, con un promedio de \$1.6263 pesos/m<sup>3</sup> (Ver Anexo II).

De acuerdo a los datos de la Tabla 17, por cada litro de agua embotellada producida, se requieren en promedio, 0.488 litros de agua de proceso<sup>42</sup>.

$$\$1.4003 \frac{\text{pesos}}{\text{m}^3} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000\text{L}} * 0.488 \frac{\text{L}}{1 \text{ botella}} = \$ 0.00068 \frac{\text{pesos}}{1 \text{ botella}}$$

Se pueden obtener los costos para los valores máximos y mínimos de consumo de agua de proceso, y se obtiene la siguiente tabla:

*Tabla 38 Costo de la contaminación de agua de proceso, por botella*

Agua de proceso (L/botella)	Costo por la contaminación de agua de proceso (pesos/botella)
Máximo = 0.954	0.001336
Promedio = 0.488	0.00068
Mínimo = 0.25	0.00035

Esto es, el agua de proceso requiere tratamiento después de su uso para regresar o acercarse a sus condiciones originales. El costo promedio de esto es de \$0.00068 pesos/botella, con máximo de \$ 0.001336 pesos/botella y mínimo de \$0.00035 pesos/botella.

## 6. COSTO AMBIENTAL DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO

En la Tabla 28 se observa que el valor de la contaminación del suelo para el año 2013 es \$1060.161 pesos/km<sup>2</sup>; los valores del Anexo II muestran una variación entre \$926.55 y \$1202.7 pesos/km<sup>2</sup> cada año, con un promedio de \$1050.9 pesos/km<sup>2</sup>.

<sup>42</sup> En este trabajo no se considera el tratamiento del agua residual doméstica, únicamente la industrial.

Tomando en cuenta el resultado de Tabla 12, la cantidad promedio de ocupación de tierra en la producción del agua embotellada es 0.011568 m<sup>2</sup> por unidad funcional, por lo que el costo por contaminación por unidad de masa de la degradación del suelo:

$$\$1060.161 \frac{\text{pesos}}{\text{km}^2} * \frac{1 \text{ km}^2}{1000000\text{m}^2} * 0.011568 \frac{\text{m}^2}{1 \text{ botella}} = \$ 0.0000123 \frac{\text{pesos}}{\text{botella}}$$

Siguiendo el mismo procedimiento se encuentran los valores máximos y mínimos, que son 1.45E-5 y 9.99E-6, respectivamente. Estos costos ambientales son muy pequeños en comparación con los costos de los demás impactos ambientales, por lo que pueden omitirse.

Es importante no perder de vista que los valores aquí calculados se basan en la información proveniente de una gran cantidad de fuentes diferentes y en una serie supuestos iniciales necesarios para suplir la falta de información específica.

En caso de disponer de mejor información, los resultados podrán ser calculados con mayor precisión.

### III. RESULTADOS

*“Los beneficios económicos y los costos ecológicos de la economía mundial están cada vez más desvinculados y esto ha generado oportunidades para la explotación por parte de los agentes más poderosos del Norte Global, a la vez que ha complicado la atribución de responsabilidades” (UNEP, 2021).*

#### A. COSTO AMBIENTAL TOTAL PARA LA UNIDAD FUNCIONAL

Los resultados promedio obtenidos en la sección anterior se condensan en la Tabla 39, donde los costos se agrupan de acuerdo a la categoría de impacto y de acuerdo a la fuente que genera el impacto<sup>43</sup>.

*Tabla 39 Resumen de costos ambientales promedio, por botella*

Categoría de Impacto			Costo por impacto ambiental (pesos/botella)	%	%
Uso y agotamiento de recursos	No renovables	Petróleo	1.0764	40.2	40.6
		Agua subterránea	0.01001	0.37	
	Renovables	Agua superficial	0.000605	0.02	
Contaminación	Residuos sólidos		0.0228	0.85	59.4
	Aire	Fuentes fijas	0.10284	3.84	
		Fuentes móviles	1.4667	54.73	
	Suelo		0.0000123	0	
	Agua		0.00068	0.025	
TOTAL			2.680045		

El resultado que se obtiene de la estimación realizada es el costo ambiental total promedio del ciclo de vida de cada botella de 1L de agua embotellada en PET y es de \$ 2.68 pesos<sup>44</sup>. Este costo ambiental se compone en: costo por contaminación (59.4%) y costo por agotamiento de recursos (40.6%).

Este resultado evidencia la importancia relativa entre cada categoría de impacto: la más importante es la contaminación ambiental por fuentes móviles (54.73%), seguida del

<sup>43</sup> La Tabla 39 también se calculó para los valores máximos y mínimos de las categorías de impacto ambiental y se obtiene un costo ambiental mínimo de \$1.1329 pesos/botella (55% por el agotamiento de recursos y 45% por la contaminación) hasta un máximo de \$6.5879 pesos/botella (35% debido al agotamiento de recursos y 65% debido a la contaminación). También se hizo el ejercicio numérico de calcular el costo ambiental para cada autor individualmente; los resultados se presentan únicamente de forma gráfica, en la Ilustración 12 del Anexo IV. En esta gráfica se observa que la gran diferencia entre la media y el máximo se debe a un solo estudio de ACV, específicamente de Horowitz et al (2018), debido a que define una gran distancia para el transporte de la botella.

<sup>44</sup> Los resultados obtenidos con los valores de Dettore (2009) son parecidos, siendo el costo ambiental total de \$2.6284 pesos, con el 37.4 % del costo ambiental debido al agotamiento del petróleo y el 57% debidos a la contaminación por fuentes móviles. Los resultados están en la Tabla 47 del Anexo IV.

agotamiento del petróleo (40.2%), y en tercer lugar, la contaminación ambiental por fuentes fijas (3.84%).

Estas categorías de impacto están relacionadas entre sí, puesto que provienen del uso de petróleo como combustible, que al degradarse o agotarse produce gases que contaminan el ambiente. En otras palabras, la combustión tiene dos efectos que deben ser considerados: la contaminación ambiental, que es la más estudiada, y el agotamiento de recursos, que generalmente no se menciona.

Sorprendentemente, la contaminación por residuos sólidos, que es visualmente más preocupante, no llega a 1%. Esto se debe a la consideración de un costo ambiental bajo, que únicamente contabiliza los costos de gestión de residuos y no a los daños ambientales provocados por los residuos (daños en el suelo, aire, ríos, lagos y mares, daño a los animales, alteración del ecosistema). Este tema es importante, pero muy difícil de resolver, como lo demuestran los estudios en los que se ha intentado hacer una aproximación al tema; el más reciente es de Merkel & Charles (2022): *The price of plastic pollution. Social costs and corporate liabilities*.

El costo ambiental es el daño que provoca la industria del agua embotellada al ambiente, presentado en términos económicos. También puede ser interpretado como la compensación económica de la industria hacia la sociedad, por los daños causados.

## B. COMPARACIÓN DEL COSTO AMBIENTAL VS. PRECIO PROMEDIO DE VENTA

Para comparar el costo ambiental por botella contra el precio de mercado, se obtuvieron los precios promedio de venta del agua embotellada de 1L en la Zona Metropolitana de Ciudad de México durante el año 2013 del sitio del INEGI, (consultado el 01/05/2021 en <https://www.inegi.org.mx/app/preciospromedio/>).

De un total de 111 valores, se obtiene un precio promedio de \$7.63 pesos, con un valor mínimo de \$5 y un máximo de \$9.50 pesos.

Entonces, el valor calculado de los costos ambientales (\$2.68 pesos/botella) corresponden a un 35.13% del precio de venta promedio del agua embotellada de 2013 para Ciudad de México.

En otras palabras, en caso de existir una legislación para tasar los daños ambientales de la industria del agua embotellada, el impuesto a aplicar para compensar los daños ambientales sería del 35% del precio promedio de venta, o bien, \$2.68 pesos (valores de 2013) por litro de agua embotellada. No se debe olvidar que este es el *valor mínimo*, calculado con la información disponible.

### C. DISTRIBUCIÓN DEL COSTO AMBIENTAL ENTRE EMPAQUE (PET) Y CONTENIDO (AGUA)

El costo ambiental también se puede analizar de acuerdo a los dos integrantes del agua embotellada: el empaque (PET) o el contenido (agua bebible<sup>45</sup>). Este tipo de análisis puede asemejarse con el Análisis distribucional de Impactos Económicos propuesto por Tietenberg *et al* (2012).

Para hacer este análisis se parte de la estimación de los porcentajes de contribución a la contaminación para PET y para agua bebible resumidos en la Tabla 22, y los costos ambientales promedio resumidos en la Tabla 39, con lo que se obtiene el desglose de los costos para el PET (Tabla 40) y el para el agua (Tabla 41)<sup>46</sup>.

*Tabla 40 Costos ambientales promedio del PET por categoría de impacto, por botella*

Categoría de Impacto		Fuente	Costo por unidad de masa (pesos/botella)	% PET	Costo atribuible al PET (pesos/botella)	% costo
Uso y agotamiento de recursos	No renovables	Petróleo	1.0764	83.528	0.8991	72.6
		Agua subterránea	0.01001	0	0	0
	Renovables	Agua superficial	0.000605	75.5	0.00046	0.04
Remediación de la Contaminación		Residuos sólidos	0.02281	96.1983	0.0219	1.77
	Aire	Fuentes fijas	0.10284	94.55	0.09724	7.85
		Fuentes móviles	1.4667	14.93	0.2189	17.68
	Suelo	Proceso	0	0	0	0
	Agua	Proceso	0.00068	100	0.00068	0.055
TOTAL			2.680045		1.238389	

De acuerdo a los resultados de la Tabla 40 se observa que el costo ambiental atribuible exclusivamente al PET es \$1.2384 pesos por botella, cantidad equivalente al 46.2% del costo ambiental total del agua embotellada.

De este total, por lo menos 72 % se debe al agotamiento de recursos naturales y 27 % se debe a los costos por contaminación de aire, agua y por la generación de residuos sólidos. La contribución de los residuos sólidos al total de los costos ambientales del PET es de poco más del 1.7%, valor realmente muy bajo en comparación con el daño ambiental que provocan.

45 Se le llama agua bebible para distinguirla de agua de proceso, agua superficial, agua subterránea, agua de suministro público, o agua embotellada (el producto en sí).

46 Este ejercicio numérico se puede repetir para los valores reportados por Dettore (2009); los resultados que se obtienen se presentan en el Anexo IV, y son parecidos al ejercicio base: el costo ambiental total para el agua embotellada es \$2.6284 pesos/botella. El costo ambiental del PET es \$1.1744 pesos/botella y el costo ambiental del agua bebible es \$1.454 pesos/botella. Los porcentajes de contribución de cada categoría de impacto son prácticamente equivalentes.

Es interesante comparar que el costo por agotamiento de petróleo es 2.8 veces mayor que el costo por contaminación atmosférica, aunque provienen del mismo origen: la extracción de petróleo. Esto es así porque parte del petróleo extraído (causa del agotamiento de petróleo) se usa como materia prima para el PET, y esto implica que no se quema como combustible (no contamina el aire).

En la Tabla 41 se observa que el costo ambiental atribuible exclusivamente al agua bebible es \$1.4417 pesos por cada litro de agua embotellada, y esto corresponde al 53.8% del costo ambiental total. De este valor, más de 87% se debe a la contaminación atmosférica, y de esta, más del 99% se debe a fuentes móviles, esto es, la contaminación atmosférica generada durante la distribución y el transporte. Es notorio que el costo ambiental del agua es mayor que el del PET.

*Tabla 41 Costos ambientales del agua bebible por categoría de impacto, por botella*

Categoría de Impacto		Fuente	Costo por unidad de masa (pesos/botella)	% Agua	Costo atribuible al agua (pesos/botella)	% costo
Uso y agotamiento de recursos	No renovables	Petróleo	1.0764	16.472	0.177	12.3
		Agua subterránea	0.01001	100	0.01001	0.69
	Renovables	Agua superficial	0.000605	24.5	0.000148	0.01
Remediación de la Contaminación		Residuos sólidos	0.02281	3.7517	0.000856	0.06
	Aire	Fuentes fijas	0.10284	5.45	0.0056	0.39
		Fuentes móviles	1.4667	85.07	1.2477	86.6
	Suelo	Proceso	0	0	0	0
	Agua	Proceso	0.00068	0	0	0
TOTAL			2.680045		1.441645	

Es interesante constatar que también el agua bebible tiene efectos sobre el agotamiento de petróleo, debido al combustible usado para el transporte.

Se debe recordar que los valores de costos ambientales debidos la contaminación atmosférica proveniente de fuentes móviles son función directa de la las distancias recorridas, tanto de la distribución a las plantas de proceso, como de los distribuidores y por transporte doméstico. Hacer una estimación de las distancias recorridas por los diferentes vehículos, con diferentes productos sería interesante y recomendable, pero difícil. Sin embargo, sería la única forma de mejorar los resultados de costos ambientales del transporte.

Por otro lado, es llamativo el bajo costo ambiental por uso y agotamiento del agua, considerando que el acuífero que abastece a la ciudad tiene mayores extracciones que recargas. En ese sentido, mejorar la información sobre los volúmenes reales de extracciones de agua y mejorar la metodología para evaluar los costos ambientales específicos de Ciudad de México, podría ser un buen tema e investigación.

En las dos tablas anteriores se encuentra el valor total de los costos ambientales desglosados por envase-contenido, categoría de impacto y por fuente. Esto es, se tiene un desglose de costos ambientales muy minucioso, que permite que un único costo ambiental (\$2.68 pesos/botella) pueda ser dividido de acuerdo a los porcentajes obtenidos en las Tablas 40 y 41.

Esto es, a los productores del PET se les puede responsabilizar por \$1.238 pesos/botella y a la industria del agua embotellada por \$1.442 pesos/botella; estos, además, se subdividen en varios componentes que podrían considerarse separadamente. En la sección de discusión se habla más extensamente sobre este punto.

#### D. COSTO AMBIENTAL TOTAL DE LA INDUSTRIA DE AGUA EMBOTELLADA EN CIUDAD DE MÉXICO

En esta sección se estima la generación de total de residuos de PET atribuibles al consumo de agua embotellada en Ciudad de México. Es importante nuevamente enfatizar que **no** se considera el reciclaje del PET.

En términos generales, se estima que la composición mundial de los RSU es de 50.4% de residuos orgánicos, el plástico representa el 10.9% de los RSU, y del total de plásticos el 10% es de PET (Geyer *et al*, 2017; Izábal Noguera, 2013). En el “Diagnóstico básico para la gestión integral de los Residuos 2012” (INEEC-SEMARNAT, 2012) se determina la composición de los residuos sólidos para el país: 51.4 % es de residuos orgánicos y el 12.57% es plástico.

Sin embargo, el INEEC-GIZ (2013) reporta estimaciones específicas de la generación per cápita diaria de PET para Ciudad de México: a través de una recopilación de diversos estudios acerca de la proporción de PET como fracción de los Residuos Sólidos Urbanos tanto en el país como en Ciudad de México, calcula que el porcentaje de los envases de PET que entran al sistema de manejo de residuos de Ciudad de México (DF en ese momento) es cercano al 3.02%, mientras que en el interior del país ese valor está entre 1% y 2%. Para este estudio se considera que el porcentaje de PET en los RSU permanece sin variación en el tiempo.

La cantidad total de RSU generados en Ciudad de México se obtiene de los Inventarios de Residuos Sólidos de Ciudad de México para diversos años. Dicha información se resume en la Tabla 42, en donde además, se obtiene un valor de generación de residuos de PET diarios per cápita. De acuerdo a la información de dicha tabla, para el período comprendido entre los años 2010-2015 se generaban alrededor de 43g de PET diarios por persona, lo que equivalen a un consumo per cápita de 1.82 botellas diarias de PET de 1L. Este valor incluye también el PET generado por consumo de refrescos.

De acuerdo al Boletín No. 3469 de la LXIV Legislatura de la Cámara de Diputados (Cámara de Diputados, 2017), en México se consumen anualmente 234L per cápita de agua embotellada y 163L per cápita de refresco, esto es una proporción 1.44:1 (o bien, el 58.9% se debe al agua embotellada).

Suponiendo que esa proporción se mantiene para todos los años, la generación de PET promedio en Ciudad de México por agua embotellada es de 1.075 litros diario por persona (391.8 litros anuales por persona) y 0.75 L de refresco diario por persona. Cabe señalar que este valor es consistente con el reportado por Montero-Contreras (2016) como consumo per cápita anual de agua embotellada (391 L/persona).

*Tabla 42 Generación de RSU en Ciudad de México, 2008-2018*

Año	RSU* (T/día)	Residuos de PET (T/día) (3.02% de los RSU totales)	Población (hab)**	PET (g/día·cápita)	Botellas de PET per cápita al día	Botellas de 1L de Agua por persona al día (58.9% del PET)
2010	12589	380.2	8,851,080	42.9	1.810	1.066
2013			8,891,624			1.075
2015	12843	387.9	8,918,653	43.5	1.835	1.0808

*Fuente: \*Inventario de Residuos Sólidos de Ciudad de México, diversos años; \*\*INEGI, diversos años*

*Nota: Los valores para 2013 se obtienen por interpolación lineal.*

Por lo tanto, con la información de las fuentes consultadas, la acumulación anual de residuos de botellas de PET en Ciudad de México generadas únicamente por el consumo de agua embotellada se estima en 3,488 millones de botellas anuales.

Tomando en cuenta que se destinaron \$2026.5 millones de pesos para el manejo de un estimado de 12500 toneladas diarias de RSU (GDF, 2012), el costo ambiental total de la industria del agua embotellada es más de cuatro veces que el presupuesto asignado para el manejo de los residuos sólidos de Ciudad de México.

Considerando que el costo ambiental del agua embotellada es de \$2.68 pesos por botella (a precios de 2013), la industria del agua embotellada en Ciudad de México genera costos ambientales por un valor \$9,349 millones de pesos cada año (pesos de 2013); mientras que los ingresos estimados por sus ventas de agua embotellada alcanzan los \$26,620 millones de pesos anuales. Estas cifras hablan por sí mismas.

En la siguiente sección se discute el significado, alcances y relevancia de los resultados anteriormente mostrados.

## IV. DISCUSIÓN

---

*“The wars of the twenty-first century will be fought over water”  
[Las guerras del siglo XXI se pelearán por el agua]  
Ismail Serageldin*

En esta sección se hace una discusión sobre algunos temas importantes que se encontraron durante el desarrollo de este trabajo.

### DISCUSIÓN SOBRE LA METODOLOGÍA

a. **Sobre el cumplimiento de los objetivos:** con la metodología utilizada fue posible la estimación de los impactos ambientales y su cuantificación económica, por lo que se pudo comprobar la hipótesis y cumplir con el objetivo general y los objetivos específicos.

b. **Sobre la importancia de la metodología utilizada:** con la metodología utilizada se obtuvieron resultados concretos, interesantes, útiles y aplicables. El uso conjunto de Análisis de Ciclo de Vida, balances de masa y la información de contabilidad ambiental se puede considerar como una herramienta valiosa para evaluar el costo ambiental del ciclo de vida de un sinnúmero de procesos y productos, para analizar impuestos ambientales diferenciados, para la determinación de responsabilidades, para evaluar la sustentabilidad de procesos o productos, para ponderar las diferentes categorías de impacto y priorizar su importancia relativa, para jerarquizar los daños ambientales, para jerarquizar propuestas de solución de alguna problemática ambiental específica, y como herramienta para la asignación de responsabilidades a los causantes de daños ambientales.

No se debe perder de vista que si se usa información de contextos diferentes, se debe ser cautos al considerar estos resultados. Esto no significa que los resultados carezcan de validez o importancia; por lo contrario, son resultados preliminares y un buen punto de partido para una propuesta de evaluación específica en una siguiente etapa.

c. **Sobre la importancia de presentar los resultados de forma unitaria:** la problemática ambiental de cualquier industria, y en particular la que nos ocupa en este trabajo, es siempre de enormes dimensiones. De ahí la importancia de presentar los resultados a una escala personal, como en este caso, botellas de un litro: al contextualizar los resultados del daño ambiental provocados por cada botella, es más fácil visualizar y dimensionar la extensión del daño de forma personal, didáctica y a una escala humana. Además, muchos de los cálculos se facilitan, porque se prescinde de la necesidad de conocer el tamaño del mercado, al hacer los cálculos y presentar todos los resultados de acuerdo a la unidad funcional.

d. **Sobre las fuentes de incertidumbre en los ACV:** Pueden existir varias fuentes de incertidumbre tanto en los estudios de ACV, ya que los valores de los resultados son función directa de la información inicial con la que cada investigador realizó los cálculos; en esto

también influye el hecho que se adoptaron estudios realizados para diferentes países y con las diferentes distancias de transporte industrial, comercial y doméstico consideradas para calcular las emisiones gaseosas. Estas incertidumbres únicamente desaparecerán cuando se haga un estudio de ACV específico para las condiciones de Ciudad de México, con énfasis en la determinación del uso de transporte.

e. **Sobre el número de ACV que se usaron para el análisis:** En este trabajo se utilizó la información de ocho trabajos de ACV. No es extraño que se usen los resultados de varios ACV; como ejemplo está el trabajo de Sieverding et al, (2015), que utiliza la información de 9 estudios de ACV para evaluar algunos impactos ambientales, y reporta promedios y valores máximos y mínimos. La razón de validez de este procedimiento es que se escogen estudios de ACV que sean equivalentes en cuanto a delimitación de fronteras del sistema, la tecnología utilizada en el proceso químico (tecnología constante), el manejo de fin de vida de residuos y los indicadores de impacto ambiental requeridos.

Estadísticamente hablando, usar un pequeño número de estudios puede parecer poco significativo, sin embargo, no lo es. De hecho, un ACV no se considera como un dato aislado: es un conjunto enorme de información técnica y operativa reunida, con la que se hacen cálculos para obtener información sobre los posibles impactos ambientales del sistema en estudio. Un solo estudio tiene validez por sí mismo.

Por la complejidad para realizar un estudio de este tipo, existe un número limitado de estudios publicados que pueden usarse para representar algún sistema en particular.

De todas formas, no se debe perder de vista que los resultados obtenidos para Ciudad de México, son a nivel de referencia o estimado inicial. Por supuesto que se puede mejorar la certidumbre de los resultados si se parte de una mejor y más completa información inicial y sobre todo, si se hace una ACV con información específica para Ciudad de México.

f. **Sobre las fuentes de incertidumbre en los costos ambientales:** la valoración económica de los daños ambientales siempre debe interpretada con cuidado y sin perder de vista que el valor monetario calculado de los daños ambientales es, por lo general, una pequeña parte del costo ambiental total.

La mayor parte de la información de costos ambientales utilizados en este trabajo proviene de las Cuentas Económicas y Ecológicas de México, que son importantes, útiles y muy interesantes. Puesto que son calculadas específicamente para México, no existe el problema de la transferencia de costos espacial entre países, pero sí se debe ser consciente que, en principio, debe existir una diferencia entre los valores promedios calculados para todo el país y los valores particulares que le corresponden a Ciudad de México, sobre todo para el costo de agotamiento del agua subterránea, y el costo de gestión de residuos sólidos urbanos sin disposición adecuada.

El caso particular de Ciudad de México, los costos ambientales concernientes al agua no están evaluados de manera suficiente y extensa. Esto aplica tanto para el caso del agua

superficial que se importa de otras cuencas, y para el caso del agotamiento del agua subterránea, que es un problema de proporciones alarmantes.

Es necesario resaltar que en los resultados obtenidos en este estudio claramente se refleja la preocupación actual sobre el calentamiento global, evidenciado en el alto costo de los efectos de los gases de efecto invernadero y por lo tanto, la preponderante contribución del transporte a los daños ambientales. Sin embargo, queda la incógnita de cómo estos resultados puedan modificarse con un cálculo más extensivo e inclusivo de otros daños y costos ambientales no considerados como pérdida de biodiversidad, efectos a la salud humana, animal y vegetal por toxicidad, daños por destrucción de los ecosistemas, contaminación de suelos y aguas, efectos de la subsidencia, pérdida de recursos no renovables, que están claramente subvaluados o no considerados en los costos ambientales disponibles.

Adicionalmente, es ineludible hacer una reflexión pública sobre la responsabilidad de la industria global de agua embotellada -aun cuando no toda esté localizada directamente sobre las costas- respecto a los daños a los mares causados por la contaminación plástica desde hace más de tres décadas, que está causando alarma mundial por su gravedad, extensión y dificultad para ser resuelta.

Adicionalmente, es importante recordar que aquí únicamente se toman en cuenta costos ambientales, por lo que faltaría incluir en la evaluación el costo social.

Sin duda este estudio puede considerarse el punto de partida para un estudio más profundo y concienzudo sobre la industria del agua embotellada y sus consecuencias ambientales y sociales en Ciudad de México y en todo el país.

**g. Sobre la elección de las categorías de impacto ambiental:** Se escogieron las categorías de impacto que estuvieran reportadas en los ACV y de las que también se tuviera información sobre los costos ambientales. De este conjunto, se seleccionaron las más relevantes y más frecuentemente reportadas, como consumo de energía y potencial de calentamiento global; algunas se eligieron por su importancia para el estudio actual (generación de residuos sólidos, consumo de agua) y también se eligieron algunas otras para evaluar su importancia relativa.

No obstante, y debido a lo reciente del tema, en ninguno de los ACV se incluye información sobre los efectos toxicológicos a corto, mediano y largo plazo de los plásticos de cualquier tamaño cuando son depositados en el ambiente. Este tema será, sin duda, algo que debería aumentar significativamente el costo ambiental del agua embotellada.

## DISCUSIÓN SOBRE LOS RESULTADOS Y SUS IMPLICACIONES

**h. Sobre el costo ambiental del agua embotellada:** El primer resultado obtenido es el costo ambiental que le corresponde a una botella de PET de un litro de volumen, y es \$2.6801 pesos (valores de 2013). Este valor puede interpretarse como un costo adicional o impuesto

que la industria del agua embotellada en Ciudad de México tendría que pagar para compensar los daños causados por la contaminación y el agotamiento de los recursos.

Este resultado, corresponde al costo ambiental mínimo, que probablemente aumentará conforme se disponga de más y mejor información científica y económica que complementa la información actual, especialmente en lo relativo a los efectos de toxicidad, daños a la salud, mortalidad, pérdida de biodiversidad por la contaminación plástica en ríos, océanos, atmósfera y suelo.

Los impuestos ambientales, también llamados pigouvianos, son un instrumento de política ambiental que sirven para reflejar el costo de los daños ambientales (comúnmente llamados externalidades) generadas en el sistema productivo. Con ellos se ataca directamente las fallas de mercado y provee un incentivo continuo para abatir la contaminación, aún después de que ya se haya logrado un abatimiento significativo del daño ambiental; además se promueve la búsqueda de innovación tecnológica y alternativas más sustentables por parte de los productores. Un impuesto ambiental bien diseñado incrementa el precio del bien o la actividad para reflejar el costo del daño ambiental o, por lo menos, direccionar los precios en ese sentido (OECD, 2017).

Los impuestos ambientales no son atípicos, de hecho en la actualidad existen varios impuestos de este tipo que ya se aplican sobre todo en la Comunidad Europea y Estados Unidos en áreas como uso de la energía, transporte, extracción de recursos no renovables, extracción de agua, contaminación del agua, generación de gases de efecto invernadero, generación de residuos sólidos, por toxicidad de ciertos químicos. Respecto a los residuos plásticos, en el reporte “The new plastic economy global commitment. 2019 Progress Report” la UNEP (2019) menciona los avances de los acuerdos con gobiernos, productores e instituciones para la reducción de empaques plásticos; pero no se hace mención del PET ni de las botellas de bebidas.

Existen algunos ejemplos alrededor del mundo en los que se ha intentado aplicar algún impuesto al agua embotellada: En el estado de Washington se ha aplicado un impuesto al agua embotellada de forma intermitente y desde 2017 se impuso de nuevo (Decker, 2017). En 2013, en la Universidad de Berkeley se logró una disminución del 3% del consumo del agua embotellada comprada al imponer un impuesto entre 6.5-9.5% (Berck et al, 2013). En 2008, en la Ciudad de Chicago se impusieron 5 centavos de dólar por botella de agua vendida (Equivalente a \$0.64 pesos de 2013 por botella de 1L); con esto se logró una recaudación de \$38 millones de dólares en los primeros 5 años y actualmente sigue vigente (Gleick, 2013). La Ciudad de Concord, Massachusetts ha prohibido la venta de botellas individuales de agua embotellada (Gleick, 2013). En 2019, en Florida se hizo la propuesta de tasar a las empresas embotelladoras con un impuesto de 12.5 centavos por galón (equivalente a \$0.21 pesos de 2013 por botella de 1L), únicamente como impuesto a la extracción de agua (Boesen, 2020 consultado el 26/2/2021). En México en 2013 se presentó una Iniciativa de Ley del Impuesto Especial sobre producción y Servicios para que a los envases de PET se les aplique una cuota de 5 pesos por envase no reciclado (Castellanos et

al, 2013). Aunque desde 2018 se ha tratado de regular el uso de plásticos de un solo uso en Potosí, Jalisco, Tamaulipas, Sonora, Puebla, Tabasco, Nayarit y Ciudad de México, en ningún caso se ha incluido al agua embotellada (Rivas, 2019).

Probablemente, esto se deba a que aplicar un impuesto al agua embotellada es controvertido, por tratarse de un producto “necesario”. Sin embargo, las embotelladoras trasnacionales tienen un mercado cautivo y enormes ganancias y no tienen incentivo de mercado para tomar en consideración el daño ambiental en sus decisiones de producción; por lo tanto el patrón de producción no va a cambiar sin la intervención del gobierno (Montero-Contreras, 2015; OECD, 2017) y una forma de disminuir las ganancias de una empresa, para limitar su expansión, es la imposición de un impuesto.

Aplicar un impuesto al agua embotellada en Ciudad de México tendría dos posibilidades: aumentar el precio de venta del agua embotellada equivalente al impuesto por costo ambiental, esto es, \$2.68 pesos por litro o un 35% del precio de venta; o bien, que la empresa internalice el valor de los costos ambientales y disminuya sus ganancias.

En el primer caso, el productor no vería cambio directo en sus ganancias, debido a que en México la demanda del agua embotellada respecto al precio es inelástica a causa de la poca confiabilidad y cuestionable calidad del suministro de agua municipal, por lo que el patrón de consumo de este producto no variaría con un aumento de precio derivado de algún impuesto ambiental puesto que los impuestos funcionan bajo el supuesto de la demanda elástica (Ortega Castañeda, 2016). En cuanto al consumidor, se vería perjudicado aún más por el aumento de precio de dicho producto. Se debe recordar que gran parte de Ciudad de México depende del agua embotellada como fuente de agua potable, por los problemas de deficiencia y baja calidad del suministro público que ha persistido a lo largo de décadas. Por lo tanto, a la par de tratar de disminuir el consumo de agua embotellada a través de la imposición de un impuesto, es indispensable resolver también la causa original del problema, que es la falla del gobierno en la gestión del agua. Esto es, el gobierno debe garantizar el abasto de agua suficiente, de calidad y asequible para toda la población. Sería interesante la promoción de filtros de agua domésticos, y la instalación obligatoria de fuentes de agua o bebederos de agua potable en lugares públicos y privado.

La segunda alternativa es que el precio de venta no suba, con lo cual sería la empresa la que vería disminuidas sus ganancias por la imposición del impuesto. Aunque esto puede parecer una amenaza hacia las empresas, Greene (2021) considera que debido a las grandes ganancias de Danone, Coca-Cola y Nestlé por las ventas de agua embotellada y la dependencia que de dichas corporaciones trasnacionales tienen en esas ganancias para sostener sus otras divisiones (y a los inversionistas), las corporaciones continuarán haciendo lo que esté en su poder para mantener ese negocio y continuar con el *statu quo*.

Esta última sería la mejor alternativa para la sociedad, porque además de que ello no implica un aumento de precio del agua embotellada, las empresas disminuirían sus ganancias con lo cual, en principio, se limitaría la expansión de dicha industria; además sería un aliciente

para la búsqueda de alternativas más sustentables y menos costosas ambientalmente hablando.

En particular, el impuesto al agua embotellada ha demostrado ser efectivo por un par de razones: por un lado, podría modificar el comportamiento del consumidor, y por otro lado, como fuente de ingreso para los gobiernos. Dependiendo del diseño de este tipo de impuestos, pueden existir variaciones significativas en su efectividad económica y ambiental (OECD, 2017).

Mientras tanto, el consumidor no vería comprometida la asequibilidad al agua embotellada, punto importante porque en Ciudad de México el agua embotellada se ha convertido en un producto casi indispensable debido a las deficiencias en el suministro: las condiciones coyunturales de Ciudad de México no son favorables para permitir una rápida disminución del consumo de agua embotellada.

En ambos casos, los impuestos recaudados deberían usarse, necesariamente, a solucionar la problemática causante del consumo de agua embotellada y subsanar las causas que provocan daños ambientales, esto es, a mejorar la accesibilidad de agua potable de toda la población, en todo momento y en todo lugar. Esto podría lograrse con acciones como: distribución de filtros caseros para potabilizar agua, instalación de bebederos en plazas, centros comerciales, cines, teatros, oficinas, centros comerciales, centros de trabajo; recuperar el acuífero de la ciudad por medio de inyección de agua pluvial, construir plantas de tratamiento de aguas residuales y reutilizarla en la misma ciudad, y solucionar el consabido problema de fugas de las tuberías y por último, pero no por eso menos importante, con educación ambiental.

i. **Sobre el agotamiento de agua subterránea de Ciudad de México:** Este tema tiene dos aspectos a considerar: la falta de agua en sí y la subsidencia de los suelos.

Dentro de la bibliografía revisada para este trabajo, no se encontró ningún estudio que estime y cuantifique los daños a la infraestructura urbana pública y privada, y que proponga una valoración económica de los daños que se han derivado de ello a lo largo de décadas de desecación. Sería muy interesante, útil y relevante incluir este rubro en el costo ambiental del agotamiento del agua subterránea; probablemente podría ser el factor detonante para limitar la extracción de agua.

Respecto al abastecimiento de agua, a pesar de que la sobreexplotación del acuífero de la Zona Metropolitana de Ciudad de México es conocida desde hace décadas, y que la cantidad no es suficiente para abastecer toda la ciudad, la disminución real no es evidente hacia la mayoría de la población por el volumen de agua que provee el Sistema Cutzamala.

Debido a las implicaciones sociales, ambientales, económicas y de salud provocados por el agotamiento de agua subterránea a corto o mediano plazo en Ciudad de México, puede considerarse que este es un problema importante, difícil de resolver y que requiere acciones inmediatas para evitar un muy probable y cercano colapso de la ciudad.

Una de las causas de origen de este problema es la falta de transparencia y vigilancia de las concesiones de agua subterránea otorgadas a las empresas embotelladoras: no existe información ni control sobre el volumen real de agua usado por las empresas embotelladoras (y ninguna otra empresa) ni información pública sobre la producción de agua embotellada en la Ciudad de México.

El tema de las concesiones ha sido ampliamente discutido en diferentes instancias, pero por el momento, no es probable alguna solución.

j. **Sobre el bajo costo ambiental de los residuos plásticos:** Es notorio el bajo costo por generación de residuos sólidos calculado en este trabajo, tomando en cuenta que es uno de los problemas más difundidos; esto se debe a que únicamente se considera el costo por gestión de los residuos colectados y el costo de los no colectados.

En estos costos, sin embargo, no se considera el costo de *daño ambiental* de los residuos sólidos, que puede incluir el valor de los servicios ecosistémicos perdidos al usar el área del sitio de disposición final, como servicios de infiltración de agua, de purificación de aire, área de agricultura, o área de conservación de biodiversidad, además de los daños los provocados a los seres vivos por alteración de su hábitat, y los daños provocados por la introducción de microplásticos a la cadena trófica.

Además, también se debería considerar el costo por los efectos tóxicos a la salud (hasta hoy en día prácticamente desconocidos) provocado por macro y micro plásticos, además de considerar el costo de la restauración o recuperación del sitio. Como explica Pindyck (2009) los costos de gestión no llegan a compensar el costo social y ambiental total.

De hecho, la contaminación por plásticos, principalmente en cuerpos de agua, es un tema relevante y se están haciendo esfuerzos científicos por cuantificar la magnitud del daño en ríos, lagos y mares, el potencial toxicológico para el ser humano y el ecosistema. Sin embargo, aún existe mucha incertidumbre con respecto a la liberación de aditivos, a la fotodegradación en el medio marino o a la transferencia trófica (UNEP, 2021). En este estudio, no se consideró el costo del daño a cuerpos de agua porque no es posible determinar si existen botellas de agua de Ciudad de México que lleguen al mar, y en qué cantidad.

Adicionalmente, aun cuando recientemente se ha mejorado la colecta de PET, sería interesante hacer esta evaluación de los efectos de los residuos generados en épocas pasadas y que siguen, y seguirán, provocando daños.

k. **Sobre los residuos sólidos ya existentes:** La recolección de PET está normalizada en Ciudad de México y ECOCE reporta unos altísimos niveles de reciclaje para esta localidad (valores que deberían ser cuestionados). No obstante, y de acuerdo a la investigación de Geyer et al (2017) en la que calcula que únicamente se ha reciclado el 9% de los desechos plásticos producidos, existen en los sitios de disposición final residuos de PET antiguos que ya no pueden ser reciclados y que han causado y seguirán causando problemas ambientales.

Esto es, los residuos generados en épocas cuando no se realizaba recolección y el reciclaje de PET permanecerán en el ambiente indefinidamente, causando problemas de contaminación por macro y micro plásticos al suelo, aire y agua, toxicidad y daños al ecosistema y a los humanos. Este es un costo ambiental que no se contabilizó en este trabajo y que, sin duda, es relevante. Sería interesante investigar más sobre este tema posteriormente.

**l. Sobre la contaminación del aire:** Este tema está directamente relacionado con el cambio climático y es de preocupación mundial. Esto se ve reflejado en los costos de las categorías de impacto de contaminación ambiental reportados por los investigadores, sobre todo la proveniente de fuentes móviles.

En este trabajo se dividió el estudio de la contaminación ambiental de acuerdo a las fuentes que la generan: las fuentes fijas son los procesos industriales y las fuentes móviles se refieren al transporte. Esto se pudo hacer gracias a la desagregación de valores que reporta el INEGI. Es digno de mencionar que esta desagregación por tipo de fuentes presentada por el INEGI es una ventaja que casi ningún otro reporte presenta.

La contaminación atmosférica provocada por fuentes móviles es función directa de las distancias recorridas por los camiones de carga, vehículos de distribución o vehículos particulares. Por no estar en el alcance original de este trabajo, no se hizo un estudio particular para estimar o determinar las distancias reales recorridas en promedio para cada botella de agua en Ciudad de México y se mantuvieron las distancias especificadas en los diferentes estudios de ACV, lo cual es una fuente de incertidumbre. Sin embargo, se puede suponer que las distancias recorridas por los vehículos de distribución y de vehículos particulares sean mucho mayores que los reportados, debido a las grandes distancias que se recorren en esta ciudad, una de las más grandes del mundo.

La determinación de distancias de transporte y el tipo de vehículos utilizados es un tema clave que debe estudiarse a profundidad, para obtener resultados más específicos para la Ciudad de México.

**m. Sobre la desagregación de costos por contenido y envase:**

En los Resultados, se desglosan los costos ambientales de acuerdo a la contribución del PET (envase) y agua (contenido) y por categorías de impacto ambiental, y con ello se obtienen resultados valiosos, incluyendo la posibilidad de distribución de responsabilidades<sup>47</sup> entre los productores del envase y del contenido.

---

<sup>47</sup> Los porcentajes de contribución al impacto ambiental analizados de forma individual para el PET y al agua bebible provienen de un único estudio, específicamente el de Dettore (2009), gracias al desglose de información que el autor reporta. Por lo tanto, los resultados obtenidos a partir de las proporciones reportadas son estimativos. Para determinar valores específicos de Ciudad de México, sería necesario hacer un ACV en el que se desglosaran los resultados de acuerdo a las etapas de ciclo de vida y a cada categoría

En una primera evaluación se desagrega el costo ambiental del PET (\$1.2384 pesos/botella) y el costo ambiental del agua bebible (\$1.4417 pesos/L). Este primer desglose es relevante, porque se evidencia que el costo ambiental del agua embotellado no corresponde exclusivamente al PET.

Para continuar la evaluación, se analiza el costo de acuerdo a cada categoría de impacto. El costo ambiental del envase de PET se compone en 72.6% por su contribución al agotamiento de petróleo y 31.6% por la contribución a la contaminación atmosférica, tanto de fuentes fijas como de fuentes móviles, siendo estas últimas las de mayor proporción. El costo ambiental del agua bebible se compone en un 87% del costo de la contaminación atmosférica, mayoritariamente de fuentes móviles, y un 12% por agotamiento de petróleo.

Esta desagregación de costos ambientales puede servir de pauta para una propuesta de impuestos ambientales diferenciados, como se explica a continuación:

A los productores implicados en la fabricación de las botellas de PET se les puede aplicar un impuesto al agotamiento de petróleo de \$0.899 pesos por botella, equivalente al 72.6% del costo ambiental total calculado; el costo por la generación de residuos es \$0.0219 por botella (1.8% del total), y la contaminación atmosférica se puede tasar en \$0.316 pesos por botella (31.6%) compuesto mayoritariamente por la contaminación atmosférica causada por fuentes móviles (17.7%).

El costo ambiental referente al agua bebible contenida en una botella de 1 L, se compone de \$0.177 pesos por el agotamiento de petróleo (12.3 %), y por la contaminación ambiental derivada del transporte del producto de \$1.2477 pesos (86.6%), además de un (muy bajo) impuesto a la extracción de agua subterránea (0.69%).

La diferenciación de impuestos puede ser útiles en casos difíciles, como el del presente trabajo, cuando el producto puede ser considerado, erróneamente, de consumo básico, y generar controversias por la aplicación de un impuesto. En este caso, puede ser más fácil únicamente tasar algunos aspectos, como la contaminación ambiental o la generación de residuos y/o aplicar los impuestos escalonadamente.

Con las responsabilidades jerarquizadas, también se pueden definir las acciones de prioritarias: Puesto que la mayor contribución de la industria del agua embotellada a la generación costos por daños ambientales es el del transporte de todas las etapas del ciclo de vida, la solución principal debe estar encaminada a disminuir y/o mejorar la eficiencia del transporte, de todas sus etapas.

---

de impacto. Para ello, sería clave y determinante la información de las distancias recorridas por todos los vehículos de transporte, particulares, comerciales e industriales.

El hecho de sustituir el PET por otro material, degradable o no, reciclado o no, no contribuiría significativamente a la disminución de los costos ambientales. Aun cuando se reciclara el 100% del PET generado, los costos ambientales totales disminuirían menos de un punto porcentual, y además se aumentaría el costo ambiental por la contaminación ambiental derivada del transporte de los residuos al lugar del re-procesamiento. En caso de fabricar alguna botella con material degradable, se disminuiría el consumo de materias primas como el petróleo o gas, efecto sin duda positivo, pero se tendrían que considerar los efectos ambientales adicionales del nuevo proceso; y además, los costos ambientales del transporte del producto final continuarían prácticamente sin cambio.

Con esto se fundamenta la postura de varias corrientes académicas que afirman que el reciclaje de materiales no es la mejor alternativa para un problema de contaminación por residuos sólidos. La mejor solución para un residuo es no generarlo.

En las búsquedas de información realizadas no se encontró ningún ejemplo donde se proponga un impuesto basado en todo el ciclo de vida y considerando en conjunto los principales problemas ambientales. Aun cuando en este trabajo los cálculos se realizan con los valores generales encontrados en literatura, éste puede considerarse como un procedimiento útil para la asignación de responsabilidades, ya que está basado en los cálculos científicos, técnicos y económicos estandarizados.

#### **n. Sobre la Responsabilidad Extendida del Productor (REP):**

Actualmente los impuestos específicos para tasar los residuos sólidos se aplican como cuotas por Responsabilidad Extendida del Productor (REP).

La Responsabilidad Extendida del Productor, también conocido como “el productor paga” o “el que contamina, paga”, es una estrategia en la que el costo de fin-de-vida de un producto o empaque se internaliza a través de cuotas y puede ser reflejado en el precio del producto (OECD, 2017; Fuhr et al, 2017). Según la OECD (2016) la Responsabilidad Extendida del Productor tiene como objetivo hacer responsables a los productores de todos los impactos ambientales del empaque de sus productos desde el diseño hasta la fase pos-consumo para disminuir el gasto destinado a la gestión final de los residuos e incrementar el reciclaje. En este esquema se tiene la ventaja que el mismo productor se debe hacer cargo de evitar, controlar o disminuir los problemas ambientales relacionados con sus propios residuos. La limitante es que únicamente se refiere a algunos residuos sólidos, y no están atendidas otras consecuencias ambientales como contaminación atmosférica derivada del transporte o la degradación del ecosistema por el uso de materias prima o la toxicidad de los materiales.

Se considera que la REP está bien aplicada cuando el costo neto total de las operaciones de manejo de los residuos está cubierta completamente por la industria que los introdujo al mercado (Ferreira *et al*, 2016). La UNEP (2021) afirma que si se plantea correctamente, este enfoque crea fuertes incentivos para que los productores diseñen productos cuyos empaques puedan retenerse en la economía en lugar de ser desechados, promueve la

eliminación de empaque no necesario, estimula el uso de empaques más fáciles de reciclar, promueve la sustitución de materia prima virgen por materia reciclada, y promueve un cambio en el diseño del producto o de sus materiales.

Existen cuatro categorías de instrumentos de política de REP usados en épocas recientes, principalmente en la Unión Europea (OECD, 2016):

- Regreso obligatorio o voluntario del producto usado (el 70% de las políticas implementadas), como empaque, baterías, vehículos, eléctricos y electrónicos.
- Instrumentos económicos como reembolso de depósito (11%), cuotas (17%), impuestos al uso de materias primas vírgenes, impuestos al productor.
- Reglamentos, por ejemplo, de contenido mínimo reciclado.
- Instrumentos basados en la información, como reportes, etiquetado de productos o componentes, educación del consumidor.

De acuerdo a la OECD (2017), el 90% de las medidas de REP implementadas en el mundo se concentran en la Unión Europea (desde los años 1990s) y en USA, y son sobre todo para electrónicos (35%), llantas (18%), para empaques (17%) y baterías de autos (12%). Los impuestos se dan por tonelada depositada en el relleno sanitario, y deben ser relativamente altos para lograr desalentar la generación de residuos o incrementar su separación, complementando con supervisión para evitar los tiraderos ilegales, con educación y mejoramiento de las normas sociales<sup>48</sup>.

---

<sup>48</sup> En 2002, la Unión Europea aprobó una ley que hace a los productores financieramente responsables de reciclar los artefactos o aparatos que producen (Tietenberg, 2012). De hecho, recientemente, en Julio de 2021 entró en vigor en la Unión Europea la prohibición de los 10 artículos desechables de plástico más comúnmente encontrados en las costas europeas (cubiertos, popotes, botellas, bolsas, paquetes, envolturas); además, se apoyarán los sistemas de reciclaje de plástico, para que en 2025 se recicle el 50% del plástico y en 2030 todo empaque de plástico deberá ser reciclable. Pero más importante aún, se establece directamente que la responsabilidad de la colecta, reciclaje y disposición final de los plásticos es exclusiva del productor (Liebel, 2021).

Específicamente para los empaques, las cuotas para los productores son 20-200 EUROS/tonelada (en promedio 92 EUROS/tonelada), a precios de 2013, equivalentes a \$339-3392 pesos por tonelada. En Bélgica, los importadores, productores o minoristas pagan una cuota en proporción al peso del producto; la cuota para el PET es de 0.1064 EUROS por kg de PET (pesos de 2013), equivalente a \$1.805 pesos por kilogramo de PET. En Corea, los productores e importadores de productos sujetos a REP se hacen cargo del etiquetado correcto, colecta y reciclaje o pagan una cuota a las compañías autorizadas; para el caso del PET es de 178KRW por kg (valores de 2012), equivalente a \$2088 pesos por kg de PET (OECD, 2016). En Francia la cuota de REP para los empaques es equivalente al 4% de los ingresos de los productores de empaques (OECD, 2017). En Japón, desde que se ha aplicado la REP en 1996 hasta 2010 se logró incrementar el reciclaje de PET de 3.5% hasta 76.7%, al mismo que el peso promedio de las botellas de PET disminuyó un 7.6%. En 2010 se logró un reciclaje de botellas de PET de 2.2 kg per cápita al año, de un total colectado de 2.3 kg per cápita al año (OECD, 2017). En Alemania, los productores e intermediarios son responsables de todos los empaques de sus productos y los recuperan en centros drop-off. Se espera que para 2021, en Nueva Zelanda ya se tenga implementado el esquema de REP para productos problemáticos, incluyendo los empaques

La propuesta cada vez generalizada de Responsabilidad Extendida del Productor avanza en sentido correcto; eventualmente este tipo de medidas deberían ser capaces de responsabilizar a las empresas por los residuos generados en el presente y en el pasado, y deberían incluir también todos los efectos de la contaminación incluyendo la marina, que ya se considera de dimensiones catastróficas.

La contaminación por residuos sólidos de plásticos no debe perder de vista la totalidad de daños causados por esta industria a lo largo de los años.

**o. Sobre las acciones preventivas y correctivas del consumo de agua embotellada:** El aumento del consumo de agua embotellada no es un fenómeno exclusivo de nuestro país; aún en países desarrollados y con excelente cantidad y calidad de agua municipal, se consumen grandes cantidades de agua embotellada como resultado de las campañas mercadotécnicas. Sin embargo, el que México ocupe el primer lugar en consumo per cápita junto con Tailandia, es indicativo de un problema más profundo.

Ortega Castañeda (2016) explica que para resolver el problema del aumento del consumo agua embotellada es necesario atacar el origen de las causas (que el falla de gobierno en la gestión del agua) y no los síntomas (las externalidades o costos ambientales).

En otras palabras, según este autor, puesto que el agua embotellada está supliendo la función del estado que es la provisión de agua potable suficiente, salubre y aceptable, el problema no se puede resolver intentando disminuir el consumo de agua embotellada, sino solucionando lo que originó de este problema, que es la falla del gobierno en la provisión de agua potable. De hecho, también el PNUMA (2021) explica que en algunos casos, los gobiernos pueden descuidar sus responsabilidades ante los ciudadanos, como la de proveer agua potable, si el agua embotellada se convierte en la fuente de consumo de facto (PNUMA, 2021).

Para esto, Ortega Castañeda (2016) propone acciones ex ante, para remediar la falla de gobierno, y acciones ex post, para remediar los daños ambientales.

Para atacar el problema ex ante (medidas preventivas) es indispensable mejorar la infraestructura hidráulica, garantizar la calidad del agua, evitar la contaminación de acuíferos, erradicar el desabasto e intermitencia del flujo de agua, control de fugas, monitoreo de la calidad de agua, hacer campañas de difusión en relación a la calidad del

---

(UNEP, 2019). En Chile está en borrador el reglamento de REP para incentivar el cambio hacia empaques reciclables debido a una reducción de tarifa por REP (UNEP, 2018). El 30 de junio de 2022 se firmó una ley en California que tiene como objetivo disminuir la contaminación plástica y hacer responsable a la industria de plástico de sus desechos. En ella se establece que para 2032 todo empaque deberá ser reciclable o compostable, además de que el 65% de los plásticos de un solo uso se deberán reciclar y deberá existir una disminución del 25% en los empaques plásticos (Office of Governor Gavin Newsom, 2022 consultado el 5/7/2022).

agua potable para disminuir la desconfianza; generalización de la instalación de bebederos de agua potable en áreas públicas y privadas; realizar campañas públicas de instalación de filtros de agua caseros, y uso de botellas no desechables (Ortega Castañeda, 2016); a lo anterior faltaría incluir la restauración del Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México a condiciones de sustentabilidad<sup>49</sup>.

Estas medidas ex ante se dan antes del consumo de agua embotellada de forma que prevengan, eviten o disminuyan el consumo de dicho producto. Estas medidas necesariamente requieren inversión y podrían financiarse, entre otras formas, a través de los fondos obtenidos por recaudación de impuestos al agua embotellada.

Pero aplicar como medida única el cobro de algún impuesto a las empresas no sería medida suficiente para lograr una disminución del consumo de agua embotellada, sino que se tendría que implementar conjuntamente con medidas que mejoraran y garantizaran la calidad y el volumen del agua abastecida en todas las zonas de la ciudad

En ese sentido, Ortega Castañeda (2016) presenta las acciones ex post (medidas correctivas) con medidas como fortalecer la regulación de la explotación de los recursos, revisar las tarifas de las concesiones, aumentar el uso de plásticos reciclados y de materiales degradables, legislar la producción de agua embotellada, legislar el desecho de los residuos, regular el precio del agua embotellada, cobrar el importe del envase, establecer una regulación publicitaria.

Las medidas ex ante son importantes ya que, como explica Morales Novelo *et al* (2007), en Ciudad de México el crecimiento de la industria de agua embotellada está directamente vinculado a la satisfacción de la demanda de agua potable por el deficiente suministro y calidad del de agua de la red pública. Esto es, no habría gran variación en el consumo de agua embotellada con las variaciones en el precio.

Las políticas públicas pueden ser una herramienta para modificar conductas humanas desfavorables para el ambiente. Sin embargo, deben acompañarse de estrategias que influyan en la sociedad, pues la conducta humana está determinada por las condiciones y no por las intenciones (Wiesner, 1998 citado por Téllez Maldonado, 2012).

La aplicación conjunta de medidas ex ante y ex post es la clave para atacar, paulatinamente, los problemas ambientales generados por la industria de agua embotellada.

**p. Sobre el costo ambiental total de la industria de agua embotellada en Ciudad de México:** este valor se estima no a partir del volumen de agua embotellada producida, sino a partir de la información oficial de residuos de PET que se manejan en el sistema de limpia. El costo ambiental calculado es de \$9,349 millones de pesos anuales.

---

<sup>49</sup> Gómez Reyes (2013) propone utilizar el agua de lluvia para la recarga del acuífero; con esto no sólo se mejoraría el acuífero, sino que se ahorraría dinero de bombeo de drenaje de agua pluvial.

Este valor de los daños ambientales puede parecer enorme, pero es probable que esté subestimado, pues de acuerdo a las más recientes evaluaciones de la Fundación Minderoo (Merkl et al, 2022), los autores calculan que, únicamente por la contaminación plástica, los costos por tratamientos médicos, limpieza ambiental y daños a la naturaleza, pueden ser comparables a los ingresos de la industria del plástico, aproximadamente \$600 billones de dólares. De hecho, estiman que los costos sociales por los daños a la salud provocados por los aditivos químicos usados en los plásticos pueden exceder los \$100 billones de dólares por año.

q. **Sobre la visión general de la industria del agua embotellada:** Es usual que el agua embotellada se identifique como un generador de problemas ambientales como la basura urbana, contaminación de mares y, en algunas ocasiones, se menciona el uso y comercialización de agua potable. Un estudio más completo también debería incluir el agotamiento de petróleo, la contaminación en aire, agua y suelo, y la toxicidad de los plásticos dispersos en diversos ecosistemas.

El agua embotellada es, en efecto, una solución inigualable en situaciones de emergencia como desastres naturales, guerras o hambrunas, o en regiones donde no existe el acceso al agua potable, por su calidad, confiabilidad y posibilidad de ser transportada a lugares donde se requiera (Pacheco-Vega, 2017). En este caso el consumo de agua embotellada es justificable y necesario (Ortega Castañeda, 2016).

Sin embargo hay una gran diferencia entre reconocer el agua embotellada como una alternativa para situaciones extraordinarias, que asumirla como un sustituto del agua potable de la red pública (Pacheco Vega, 2015). El agua embotellada considerarse únicamente como una “alternativa lujosa, costosa, conveniente, ocasional o para situaciones de emergencia” (Ortega Castañeda, 2016).

r. **Sobre una última pregunta que surge:** Si el agua embotellada, que es un producto relativamente simple, tiene un costo ambiental equivalente al 35% de su precio promedio de venta, ¿cuál será el verdadero costo ambiental de otros productos o industrias como la metalúrgica, la industria de la construcción, industria de la ropa y calzado, los agroquímicos, la industria aeronáutica, los cosméticos, la industria del transporte, los productos tóxicos, la industria farmacéutica, la industria de la guerra.....?

## V. CONCLUSIONES

---

El aumento mundial del consumo de agua embotellada se debe a múltiples actores con intereses y necesidades enfrentados: la industria con su afán de crecimiento económico permanente; la sociedad que necesita el agua para su supervivencia y modus vivendi; el gobierno con su cuestionable capacidad de acción; la naturaleza como dadora de recursos y receptora de desechos. Desde la perspectiva de cada uno de estos actores, puede existir o no un problema y la solución será diferente (Ortega Castañeda, 2016). De hecho, la industria del agua embotellada no tiene problema alguno que solucionar: es boyante y con amplias perspectivas de crecimiento.

Sin embargo, desde el punto de vista ambiental y social, sí existe un problema, y muy grande. Para el caso del agua embotellada las consecuencias se manifiestan físicamente como: disminución de las reservas recursos como petróleo o gas, disminución de agua subterránea y los daños colaterales hacia el ecosistema, además de la subsidencia en la zona de extracción de agua subterránea; alteración de las cuencas que exportan agua a la Ciudad de México que derivan en escasez en el abastecimiento de esas zonas rurales, daños a la salud de la población, disminución de agua de riego, alteración de bosques y demás ecosistemas involucrados; contaminación del aire con efectos como el cambio climático, lluvia ácida, daños a la salud, afectación a los materiales de construcción; la generación de residuos plásticos que causan diferentes problemas al ecosistema de acuerdo a su tamaño (macro o micro plásticos) y localización (disposición controlada o no controlada); afectaciones económicas por el gasto que representa para los hogares el tener que abastecerse de agua potable embotellada; y los daños toxicológicos de los macro, micro y nano-plásticos, y aditivos dispersos en el ambiente, que no por ser poco estudiados hasta el momento, dejan de ser importantes.

Hasta 2020, nuestro país seguía teniendo el mayor consumo per cápita de agua embotellada, con un promedio de 282 L/cápita, mientras en Ciudad de México el consumo llegaba a 391 L/cápita<sup>50</sup> y en una de las zonas más problemáticas de la ciudad, la Alcaldía Iztapalapa, el consumo llega a 575 L/cápita<sup>51</sup> (Rodwan, 2021; Montero-Contreras, 2015; Montero-Contreras, 2016). Esta situación conlleva un desembolso significativo para las familias que dependen de este producto para satisfacer sus requerimientos de agua potable, y un gran costo ecológico del que nadie, hasta el momento, se hace responsable.

El problema de los plásticos, sobre todo los de un solo uso, es reconocido mundialmente y está cada vez más extendida la aplicación de la Responsabilidad Extendida del Productor que obliga a los productores a responsabilizarse, de diversas maneras, del manejo final de empaques, baterías de auto, vehículos, llantas, o aparatos eléctricos y electrónicos. A partir

---

<sup>50</sup> Valor de 2015

<sup>51</sup> Valor de 2016

de 2021 en la Unión Europea se estableció que la responsabilidad de la colecta, reciclaje y disposición final de los plásticos es exclusiva del productor (Liebel, 2021).

Sin duda, la generación de residuos plásticos es un gran problema y de hecho, a la industria del agua embotellada se le asocia únicamente con la generación de residuos plásticos. Pero no son estos los únicos efectos.

Por esto, en este trabajo se estiman los costos ambientales causados por la industria del agua embotellada de Ciudad de México a lo largo de su ciclo de vida, que incluye las etapas de extracción y procesamiento de materia primas, manufactura, transporte y distribución y desecho de residuos.

Para ello se utiliza información de Análisis de Ciclo de Vida y estudios de costos de los impactos ambientales reportada en fuentes y literatura especializada. La base de cálculo del estudio, o unidad funcional, se define en una botella agua de volumen un litro envasada en PET. Con la información recabada y los cálculos realizados se obtienen cinco resultados importantes:

El **primer resultado** y más importante, porque de él se desprenden los demás, es que, de acuerdo a las premisas iniciales y cálculos realizados, el costo ambiental para cada botella de PET de un litro de volumen de agua embotellada es de, por lo menos, \$2.6801 pesos (valores de 2013).

Este costo ambiental calculado se desagrega por categoría de impacto ambiental, con lo que se obtiene la importancia relativa de cada una de ellas. En este caso, del total de costos ambientales de cada botella de agua, el 41% se debe al costo por el agotamiento de recursos no renovables (mayoritariamente el petróleo) y el 59% se debe a la contaminación ambiental (mayoritariamente la contaminación atmosférica provocada por fuentes móviles), y la contribución de los residuos sólidos es menor al 1%.

Este resultado revela que la principal contribución al costo ambiental es la del transporte y por lo tanto la solución del problema ambiental se debe enfocar primordialmente en este aspecto.

Con el **segundo resultado** se determina el valor porcentual del costo ambiental respecto al precio promedio de venta. Dado que el precio promedio de venta del agua embotellada para 2013 fue \$7.63 pesos por litro, dicho costo ambiental corresponde al 35% del precio promedio de venta. Este valor es el impuesto ambiental o pigouviano que debería pagar la industria de agua embotellada para cubrir, de forma mínima, los daños al ambiente.

Estos dos resultados, en sí, son importantes, y para entenderlo mejor, se desagrega aún más: por contribución producto-envase y por categoría de impacto ambiental; con lo que se obtienen el tercer resultado importante.

El **tercer resultado** de relevancia se obtiene cuando el costo ambiental calculado (\$2.6801 pesos por botella) se descompone por producto-envase: se obtiene que del costo total el

46% corresponden al PET (\$1.2384 pesos por botella) y 54% corresponden al agua (\$1.4417 pesos por botella).

Estos resultados son significativos porque se evidencia que el costo ambiental no se debe únicamente a la contribución del PET y marca una pauta para la definición de alguna solución a la problemática analizada: cualquier medida de solución que se limite al PET va a atacar el problema ambiental de forma limitada.

En otras palabras, la problemática ambiental del agua embotellada es generada tanto por el envase (por el agotamiento de hidrocarburos para fabricar el PET, quema de combustibles y generación de residuos), como por el agua bebible que se vende como producto (por el transporte de la misma) y la solución debe, necesariamente, enfocarse a ambos temas.

Esto es relevante porque actualmente, como parte de una estrategia mercadotécnica y de sustentabilidad, se han propuesto cambios en el material de la botella – como PET reciclado o material biodegradable como el ácido poliláctico –, sugiriendo que con esto se resuelve íntegramente el problema ambiental causado por dicha industria. Aunque es cierto que sí se puede reducir el requerimiento de hidrocarburos usados para fabricar la materia prima de la botella y también reducir la cantidad de residuos generados, debido al reciclaje o degradación, también es cierto que se aumenta el requerimiento de hidrocarburos por el combustible necesario para los procesos alternos y por el transporte necesario para movilizar los residuos a ser tratados. Pero el transporte requerido para el líquido, responsable de casi la mitad de los costos ambientales, permanecería constante.

Esto es, los mecanismos de reciclaje o el cambio hacia materiales biodegradables, son necesarios pero no suficientes para resolver íntegramente la problemática ambiental ocasionada por la industria de agua embotellada.

Por ello, el tercer resultado se amplía para explorar las categorías de impacto por producto-envase. Para el PET (envase), la categoría de impacto más relevante es el agotamiento de petróleo (72.6%), la contaminación por fuentes móviles (17.7%) y fijas (7.85%). En cuanto al agua bebible (producto), la categoría de impacto ambiental más relevante - más del 86% - es la contaminación atmosférica provocada por fuentes móviles.

Estos resultados son relevantes porque se identifica la causa principal de daño ambiental provocado por la industria de agua embotellada: casi el 47% de los costos ambientales (1.2477 pesos/botella) se deben a la *distribución del líquido per se*.

Para solventar la parte del daño ambiental correspondiente al transporte, además de mejorar el desempeño de los motores, la única alternativa es reducir el transporte y por lo tanto *reducir el consumo* de agua embotellada.

Sin embargo, es evidente que, de no existir un mecanismo regulador externo, la propia industria no va a auto-limitar su producción y su crecimiento. De ahí la utilidad de proponer

la aplicación de un impuesto, equivalente al costo ambiental calculado (\$2.6801 pesos/botella).

Se sabe que los impuestos ambientales pueden ser útiles para modificar el comportamiento del consumidor (y disminuir el consumo de agua embotellada), como fuente de ingreso para los gobiernos y para regular el mercado a través de un aumento de precios. No obstante, la aplicación de un impuesto al agua embotellada puede ser controvertida. En tal caso, puede ser más fácil la aplicación de impuestos no al producto en sí, sino al tipo de daño específico como los impuestos al uso de energía, a la extracción de recursos no renovables, a la contaminación por gases de efecto invernadero, por residuos sólidos o por toxicidad, que son mucho más comunes y aceptados. Desglosar el impuesto de un producto en varios impuestos de acuerdo a los daños ambientales ocasionados puede tener la ventaja de una implementación escalonada y menos polémica.

El desglose propuesto en el tercer resultado podría, por lo tanto, ser una pauta para aplicar diferenciadamente los impuestos de acuerdo a los diferentes impactos: el costo ambiental específico del PET (\$1.2384 pesos/botella) podría aplicarse a los implicados en la fabricación de las botellas de PET con un impuesto al agotamiento de petróleo (72.6%), por la contaminación atmosférica (25.5%), y por la generación de residuos (1.8%) a través del mecanismo de Responsabilidad Extendida del Productor (REP). Mientras que el costo ambiental específico del agua bebible (\$1.4417 pesos/botella) se puede asignar directamente a la industria embotelladora de agua, como un impuesto por el agotamiento de petróleo (12.3 %), y un impuesto por la contaminación ambiental derivada del transporte del mismo producto (87%), además de un impuesto a la extracción de agua subterránea (0.69%).

En otras palabras, con esta información se puede proponer la aplicación un impuesto ambiental al agua embotellada a cada generador de daños ambientales y según el tipo de impacto.

Desafortunadamente, las condiciones coyunturales de Ciudad de México no son adecuadas para imponer un impuesto al agua embotellada como medida correctiva de la contaminación ambiental: esto únicamente afectaría a la sociedad, que por falta de opciones viables de abastecimiento *real* de agua potable de calidad y en cantidad suficiente, tendría que continuar consumiendo agua embotellada pero a un mayor precio.

Por lo tanto, antes o a la par de aplicar un impuesto como medida correctiva, se debe solucionar la razón original que detonó, y aún mantiene, el gran consumo de agua embotellada en la ciudad: la falla de gobierno. Y es ese mismo gobierno quien debe revertir las causas del consumo de agua embotellada con medidas preventivas y correctivas.

Las acciones del gobierno para prevenir o controlar el consumo de agua embotellada (acciones *ex ante*) se deben manifestar en: una adecuada gestión y supervisión del uso del recurso hídrico (en cuanto a calidad, cantidad, distribución, suficiencia, continuidad y accesibilidad), mejoras en la infraestructura hidráulica (restauración del acuífero, control

de fugas, instalación de bebederos, distribución de filtros caseros, evitar contaminación del agua), información a la población sobre la calidad del agua y educación ambiental.

Las acciones correctivas (ex post) se deben enfocar principalmente en fortalecer la legislación y reglamentación: por la explotación de recursos, por la contaminación atmosférica, por tarifas de concesiones, como Responsabilidad Extendida del Productor por la generación de residuos; requerimientos mínimos de reciclaje o de material reciclado; reglamentos para acotar la publicidad; regulación del precio del agua embotellada y con una posible aplicación de impuestos.

En este caso, los impuestos recaudados podrían aplicarse específicamente a mejorar y a garantizar el abasto de agua suficiente, de calidad, accesible y asequible para toda la población. Para ello se podrían implementar medidas para recuperar el acuífero de la ciudad por medio de inyección de agua pluvial, para promover el almacenamiento de agua de lluvia, para la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales, para solucionar las fugas de agua de las tuberías, para implementar la distribución de filtros caseros para mejorar la calidad del agua potable, para instalar bebederos en lugares públicos y privados, y en educación ambiental.

El **cuarto resultado** es la estimación del costo ambiental total de la industria del agua embotellada para Ciudad de México: considerando al total de la población y un consumo de 1.075 litros de agua embotellada diarios por persona, se generan anualmente 3,488 millones de botellas de PET, únicamente por consumo de agua embotellada. El costo ambiental de dicha industria asciende a más de \$9,349 millones de pesos al año, en una industria que puede tener ingresos superiores a \$26 mil millones de pesos anuales.

Ante este tipo de datos, existen voces como la de Andrew Forrest (Merkl et al, 2022), presidente de la Minderoo Foundation, que cuestionan fuertemente a los dirigentes de la industria del plástico, pero cuyas palabras pueden aplicarse también a los dirigentes de la industria del agua embotellada: “La pregunta ya no es, ¿eres un buen director de la industria del plástico? Es, ¿qué estás haciendo para ayudar a la sociedad a reducir y luego eliminar la carga de la ubicua y tóxica contaminación plástica, mientras te beneficias de su daño?”.

La industria del agua embotellada genera un problema ambiental complejo. La solución de dichos problemas no va a venir de parte de la industria y del capital: sería atentar contra sus ganancias. La solución debe provenir de la sociedad y el gobierno trabajando conjuntamente, quienes pueden lograr que la gestión de los bienes comunes y de la salud ambiental sea a favor de las generaciones presentes y futuras.

*“La protección del ambiente requiere de una acción colectiva, a través de impuestos o leyes, para evitar que el costo del daño al ambiente se diluya entre los diferentes actores involucrados” (OECD, 2017)*

## VI. BIBLIOGRAFÍA

---

- Agua.org.mx (2017) *Usos, abusos y contaminación del agua en México: Industria y minería*. Disponible en: <https://agua.org.mx/editoriales/usos-abusos-contaminacion-del-agua-en-mexico-industria-mineria-i/>)
- Aragón Rodríguez, H. (2008) *Aprovechamiento productivo y sustentable de la generación de Residuos Sólidos Urbanos en México: un estudio prospectivo*. Tesis de Maestría en Economía urbana y regional. UNAM.
- Ashurst, P; Senior, D., ed. (1998) *Tecnología del agua embotellada*. Ed. Acribia, SA.
- Asociación Nacional de Productores y Distribuidores de Agua Purificada, AC (s.f.) Disponible en: [www.andapac.com.mx](http://www.andapac.com.mx)
- Azamar Alonso, A. (2017) *Escasez de agua: detonante de conflicto social en Ciudad de México*. Disponible en: <http://www.cronica.com.mx/notas/2017/1046442.html>
- Azapagic, A (2004) Life Cycle Thinking and Life Cycle Assessment (LCA), tomado de *Sustainable Development in Practice. Case Studies for Engineers and Scientists*. (Azapagic, Perdan y Clift, ed.) John Wiley & Sons, Ltd.
- Azapagic, A. (2011) Municipal Solid Waste Management: recovering energy from waste. En *"Sustainable development in practice. Case studies for engineers and scientists"*, editado por A. Azapagic y S. Perdan 2a. edición. Wiley-Blackwell.
- 5 Gyres (2017) *Plastics BAN List 2.0. Better Alternatives Now*. Disponible en: <https://static1.squarespace.com/static/5522e85be4b0b65a7c78ac96/t/5a99d29d41920278291296a4/1520030386318/5Gyres+BAN+List+2018.pdf>
- Banco de México (s.f.) Disponible en: [www.banxico.org.mx](http://www.banxico.org.mx)
- Banco Mundial (2015) *Cutzamala. Diagnóstico Integral*. World Bank Group y CONAGUA.
- Barkin, D (2004) *Mexico City's Water Crisis*. NACLA Report on the Americas, 38:1, 24-42.
- BBC (2017) *Seven charts that explain the plastic pollution problem*. Disponible en: <https://www.bbc.com/news/science-environment-42264788>
- Berck, P; Lange, PM; Stevens, A; Villas-Boas, S. (2013) *Measuring consumer responses to a bottled water tax policy*. Universidad de California, Berkeley.
- BID (2011) *Latin America's other water infrastructure*. Presentación. Disponible en: <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=36984584>
- Boesen, U (2020) *Bottled spring water target of taxes once more*. Disponible en: <https://taxfoundation.org/bottled-water-tax/>
- Brandon, J; Freibott, A; Sala, L (2019) *Patterns of suspended and salp-ingested microplastic debris in the North Pacific investigated with epifluorescence microscopy*. Limnology and Oceanography Letters.

- BP (20014) *British Petroleum Statistical Review or World Energy*. June 2014.
- Brown, L (2001) *Eco-Economy: Building an Economy for the Earth*. Earth Policy Institute. Norton & Co.
- Bruggers, J. (2022) The plastic industry searches for a 'circular' way to cut plastic waste and make more plastic. (Consultado el 6/10/2022 en <https://insideclimatenews.org/news/30092022/the-plastics-industry-searches-for-a-circular-way-to-cut-plastic-waste-and-make-more-plastics/>)
- Cabernard L; Pfister S; Oberschelp C; Hellweg S (2021) *Growing environmental footprint of plastics driven by coal combustion*. Nature Sustainability. Disponible en: <http://www.nature.com/natsustain>.
- Cámara de Diputados (2017) Boletín No. 3469. *En México, 90 millones de botellas de plástico de refresco y agua son lanzados a la vía pública, ríos y mares*. Disponible en: <http://www5.diputados.gob.mx/index.php/camara/layout/set/print/Comunicacion/Boletines/2017/Abril/13/3469-En-Mexico-90-millones-de-botellas-de-plastico-de-refrescos-y-agua-son-lanzados-a-la-via-publica-rios-y-mares>)
- Carabias J; Landa R. (2005) *Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México*. UNAM-COLMEX-Fundación Gonzalo Río Arronte.
- Carnegie Mellon University (2016) *Economic Input-Output Life Cycle Assessment. EIO-LCA: Free, fast, easy life cycle assessment*. Disponible en: [http://www.eiolca.net/Method/LCA\\_Primer.html](http://www.eiolca.net/Method/LCA_Primer.html)
- Carnegie Mellon University (2016a) *Economic Input-Output Life Cycle Assessment. Approaches to Life cycle assessment*. Disponible en: <http://www.eiolca.net/Method/LCAapproaches.html>
- Castellanos, C; Acosta, R. (2013). *Iniciativa que reforma y adiciona diversas disposiciones de la Ley del Impuesto Especial sobre Producción y Servicios, suscrita por los diputados Carlos Octavio Castellanos Mijares y Rubén Acosta Montoya, del Grupo Parlamentario del PVEM*. Gaceta Parlamentaria, Núm. 3878-VI. 8 de octubre de 2013.
- CCE (2005) *Comunicación de la Comisión al consejo, al parlamento europeo y al comité económico y social europeo y al comité de las regiones. Un paso adelante en el consumo sostenible de recursos: estrategia temática sobre prevención y reciclado de residuos*. Comisión de las Comunidades Europeas.
- COMDA (2017) *Informe sobre violaciones a los derechos humanos al agua potable y al saneamiento en México (Informe DHAYs)* Disponible en: <https://agua.org.mx/biblioteca/informe-sobre-violaciones-a-los-derechos-humanos-al-agua-potable-y-saneamiento-en-mexico/>
- CONAGUA (2012) *Atlas del Agua en México 2012*. SEMARNAT.
- CONAGUA (2018) *Estadísticas del agua en México*. SEMARNAT. México.

- CONAGUA (2020) *Actualización de la Disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zona Metropolitana de la Cd. De México (0901)*, Ciudad de México. Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas.
- Costanza, R; Cumberland, J; Daly, H; Goodland, R; Norgaard, R. (1997) *An Introduction to Ecological Economics*. St. Lucie Press and ISEE.
- Cristeche, E; Penna, J. (2008) *Método de valoración económica de los servicios ambientales*. Estudios Socioeconómicos de la sustentabilidad de los sistemas de producción y recursos naturales, No. 3
- De Bruyn, S; Korteland, M; Markowska, A; Davidson, M; de Jong, F; Bles, M; Sevenster, M. (2010) *Shadow Prices Handbook. Valuation and weighting of emissions and environmental impacts*. Delf, CE Delf. (Disponible en: [www.ce.nl](http://www.ce.nl))
- De Bruyn, S; Korteland, M; Markowska, A; Davidson, M; de Jong, F; Bles, M; Sevenster, M. (2010a) *Annexes - Shadow Prices Handbook*. Delf, CE Delf. (Disponible en: [www.ce.nl](http://www.ce.nl))
- Decker, A. (2017) *Washington State taxes bottled water once again*. Disponible en: <https://sovos.com/blog/sut/washington-state-taxes-bottled-water/>)
- Delacámara, G. (2008) *Análisis económico de externalidades ambientales. Guía para decisores*. German Agency for Technical Cooperation; CEPAL, UN. Seria: Documentos de Proyectos, No. 200
- Delgado Ramos, GC. (2010) *Agua, conflicto y seguridad*. Disponible en: <https://agua.org.mx/biblioteca/agua-conflicto-y-seguridad-2/>
- Delgado, J (2007) *Reseña: ¿Guerra por el agua en el Valle de México?* Investigaciones geográficas, Boletín 62.
- Dettore, C (2009) *Comparative life-cycle assessment of bottled vs. tap water systems*. Center for Sustainable systems. University of Michigan.
- Diario Rotativo (2022) *El presidente de México frenará concesiones de agua a empresas por sequía*. Disponible en: <https://rotativo.com.mx/2022/08/01/noticias/nacionales/mexico/el-presidente-de-mexico-frenara-concesiones-de-agua-a-empresas-por-sequia-974649/>
- DOF (2016) *Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de las aguas nacionales subterráneas del acuífero Zona Metropolitana de la Cd. de México, clave 0901, en Ciudad de México, Región Hidrológico-Administrativa Aguas del Valle de México (26/09/2020)*. Disponible en: [www.diariooficial.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5453759&fecha=26/09/2016](http://www.diariooficial.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5453759&fecha=26/09/2016)
- DOF (2021) *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. Disponible en: [www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/627005/CPEUM\\_11\\_03\\_2021.pdf?msckid=09a49330c74811ecb70b20cc2ab6bf6d](http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/627005/CPEUM_11_03_2021.pdf?msckid=09a49330c74811ecb70b20cc2ab6bf6d)

- Domínguez, J; Carrillo-Rivera, JJ. (2007) El agua subterránea como elemento de debate en la historia de México. Del libro *“México en tres momentos: 1810-1910-2010” Hacia la conmemoración del Bicentenario de la Independencia y del Centenario de la Revolución Mexicana / Retos y perspectivas*. Mayer, A. (coord.). UNAM.
- Dunmade, I. (2017) *Socioeconomic impacts of bottled water production and consumption system in a developing economy: a lifecycle approach*. International Journal of Business and Management Studies. 06(02), 471-484.
- Ecología y Compromiso Empresarial, AC (s.f.) Disponible en: <https://www.ecoce.mx>
- elcontribuyente.mx (s.f.) *Índice Nacional de Precios al Consumidor*. Disponible en: <https://www.elcontribuyente.mx/inpc>
- Elizondo, L. (2020) *An analysis of water scarcity in a drought prone city: the case os Ensenada, Baja California, Mexico*. Tecnología y ciencias del agua, 11(2), 01-55
- EPA (2019), AP-42. *Compilation of air pollutant emission factors*. 5ª. Ed. Vol. I. (capítulo 6: Organic Chemical process industry). Disponible en: <https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch06/index.html>.
- Eriksen M, Lebreton LCM, Carson HS, Thiel M, Moore CJ, et al. (2014) *Plastic Pollution in the World’s Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea*. PLoS ONE 9(12).
- Eshet, T; Ayalon, O; Schechter; M. (2006) *Valuation of externalities of selected waste management alternatives: a comparative review and analysis. Resources, Conservation and Recycling*. Volume 46 (4), 335-364.
- European Commission (2000) *A Study on the Economic Valuation of Environmental Externalities from landfill disposal and incineration of waste*. Final Main Report. European Comission, DG Environment.
- European Commission (2010) *Making sustainable consumption and production a reality. A guide for business and policy makers to Life Cycle Thinking and Assessment*.
- European Commission (s.f.) *European Platform on Life Cycle Assessmen*. Disponible en: <http://lct.jrc.ec.europa.eu>
- Ferreira, S; Cabral, M; da Cruz, NF; Simões, P; Marques, RC. (2016): *The costs and benefits of packaging waste management systems in Europe: the perspective of local authorities*. Journal of Environmental Planning and Management
- Forbes (2021) *Gobierno de la CDMX controlará servicio de agua; termina concesiones privadas*. Disponible en: <https://www.forbes.com.mx/gobierno-de-la-cdmx-controlara-servicio-del-agua-termina-concesiones-privadas/>
- Franklin Associates (2009) *Life cycle assessment of drinking water system: bottle water, tap water, and home/office delivery water*. Revised Final peer-reviewed LCA report.

- Freeman, A; Herriges, J; Kling, C. (2014) *The measurement of environment and resource values*. Theory and method.
- Fuhr, L; Simon, N. (2017) *Hacia un tratado mundial sobre los residuos plásticos*. Heinrich Böll Stiftung. 15 de junio de 2017. Disponible en: <https://mx.boell.org/es/2017/06/15/hacia-un-tratado-mundial-sobre-los-residuos-plasticos>.
- Gaceta UNAM, 29 de octubre de 2018.
- Gama, I (2020) *Coca-Cola FEMSA integra a su flotilla de distribución tractocamiones amigables con el medio ambiente*. Global Industries. Disponible en: <https://globalindustries.mx/coca-cola-femsa-integra-a-su-flotilla-de-distribucion-tractocamiones-amigables-con-el-medio-ambiente/>
- García-Sánchez, M; Güereca, L. (2019) *Environmental and social life cycle assessment of urban water systems: The case of Mexico City*. Science of Total Environment, Vol. 693, 133464
- García-Suares, T; Kulak, M; King, H; Chatterton, J; Gupta, A; Saksena, S. (2019) *Life Cycle Assessment of three safe drinking-water options in India: boiled water, bottled water, and water purified with a domestic reverse-osmosis device*. Sustainability, 11, 6233.
- Gardiner, B (2020) *El creciente negocio del plástico: así planean las mayores compañías petroleras aumentar su producción*. Foro Económico Mundial. Disponible en: <https://es.weforum.org/agenda/2020/01/el-creciente-negocio-del-plastico-asi-planean-las-mayores-companias-petroleras-aumentar-su-produccion?fbclid=IwAR0AGvm0Bh4ggjV8zVr1MtQtI7zEaecJAih31F6bSXjxkbfu4muoOkNyz50>.
- Garfí, M; Cadena, E; Sanchez.Ramos,D; Ferrer, I. (2016) *Life cycle assessment of drinking water: comparing conventional water treatment, reverse osmosis and mineral water in glass and plastic bottles*. Journal of Cleaner Production. 137, 997-1003.
- Garmendia Cedillo, X (2021). *Derecho Humano al Agua. Praxis de la Justicia Fiscal y Administrativa*. Tribunal Federal de Justicia Administrativa. Enero-Junio 2021.
- Geyer, R; Jambeck, J; Law, K. (2017). *Production, use, and fate of all plastics ever made*. Science Advances, 2017; 3.
- Gleick, PH; Cooley, HS (2009) *Energy implications of bottled water*. Environmental Research Letters. 4 (014009).
- Gleik, P (2013) *Bottled water tax*. Science Blogs el 9 de mayo de 2013. Disponible en: <https://scienceblogs.com/significantfigures/index.php/2013/05/09/bottled-water-tax>
- GDF (2012) *Proyecto de Presupuesto de Egresos del Distrito Federal para el Ejercicio Fiscal 2013*. Gobierno del Distrito Federal. Disponible en: [https://servidoresx3.finanzas.cdmx.gob.mx/egresos/Proy\\_2013/ProyectoPresuEgresosDFEjercicioFiscal2013.pdf](https://servidoresx3.finanzas.cdmx.gob.mx/egresos/Proy_2013/ProyectoPresuEgresosDFEjercicioFiscal2013.pdf)

- Gómez Reyes, E. (2013) *Sistemas de Recarga-recuperación*. Presentación de la mesa redonda “Gestión de la Recarga de acuíferos”, presentada en la Torre de Ingeniería, CU, el 16/05/2013. Disponible en: [www.agua.unam.mx/assets/pdfs/eventos/acuiferos13/EugenioGomez\\_UAM.pdf](http://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/eventos/acuiferos13/EugenioGomez_UAM.pdf)
- González-Villarreal et al. (2016) *Percepciones, actitudes y conductas respecto al servicio de agua potable en Ciudad de México*. Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 6, noviembre-diciembre de 2016, pp. 41-56
- Greene, J. (2014) *The Bottled Water Industry in México*. Report for the degree of Master of Global Policy Studies, University of Texas at Austin.
- Greene, J. (2018) *Bottled water in Mexico: The rise of a new Access to water paradigm*. WIREs Water, 5:e1286.
- Greene, J (2021) *What happens when water is commodified? Case study Mexico: dominant movements and alternative discourses in the access to water landscape*. Tesis de doctorado en Socioeconomía. Universidad de Geneve.
- Greenpeace (2021) *Urge cambiar la gestión del agua en la CDMX*. Disponible en: <https://www.greenpeace.org/mexico/noticia/9761/urge-cambiar-la-gestion-del-agua-en-la-cdmx>
- Guillén Martin, F. (s.f.) *Economic valuation within ecosystem accounting*. INEGI.
- Hahladakis, J; Velis, C; Webwr, R; Iacovidou, E; Purnell, P (2018) *An overview of chemical additives present in plastics: migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling*. Journal of Hazardous Materials, 344, 179-199.
- Hauschild, M; Rosenbaum, R; Olsen, M. (2018) *Life Cycle Assessment. Theory and practice*. Springer International Publishing AG.
- Harkin, C. (2020) *A review on plastic bioaccumulation, potential health effects and the potential to enhance biotransformation using herbal medicine and nutritional supplements*. International Journal of Complementary & Alternative Medicine. Vol 3.
- Hawkins, G; Potter, E; Race, K (2015). *Plastic Water. The social and material life of bottled water*. Massachusetts Institute of Technology Press. EUA.
- Hernández Chávez, D (2017) *Propuesta de gestión económica sustentable para el acuífero metropolitano de Ciudad de México, 2015-2050*. Debate Económico. Vol. 6(3). No. 18.
- Horowitz, N; Frago, J; Mu, D. (2018) *Life cycle assessment of bottled water: a case study of Green20 products*. Waste management (en prensa).
- ICWE (1992) *The Dublin Statment on Water and Sustainable Development*. International Conference on Water and the Environment. Irlanda. Disponible en: [www.un-documents.net/h2o-dub.htm](http://www.un-documents.net/h2o-dub.htm)
- IMCO (2015) *La NOM-044: Retos y oportunidades para su cumplimiento*

- IMCO (2016) *Crónica de una contingencia anunciada. Recomendaciones para reducir la contaminación del aire en el largo plazo.*
- IMCO (s.f.) *Calculadora de riesgos por contaminación atmosférica.* Disponible en: <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fimco.org.mx%2Fwp-content%2Fuploads%2F2013%2F09%2FCalculadora-Final-24Sep13.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK>
- INEEC-GIZ (2013). *Estudio de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del manejo de envases de bebidas de polietileno tereftalato (PET) en la fase de pos-consumo.* México.
- INEEC-SEMARNAT (2012) *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos.* Versión Extensa.
- INEGI (2013) *Sistema de Cuentas Nacionales de México. Cuentas económicas y ecológicas de México 2007-2011. Año base 2003.*
- INEGI (2018b) *Sistema de Cuentas Nacionales de México. Fuentes y Metodologías, Año base 2013.*
- INEGI (2018c) *Sistema de Cuentas Nacionales de México. Metodología.*
- INEGI (2019) *Cuentas Económicas y Ecológicas de México 2018.* Comunicado de Prensa Núm. 640/19
- INEGI (s.f.) *Económicas y Ecológicas. Base 2013.* Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/ee/2013/default.html#Tabulados>
- INEGI (s.f.) *Esquema ampliado del SCNM con los balances de los activos y ajustes ambientales/ Balances de activos y ajustes por cambios en el agotamiento de los recursos naturales y por degradación del medio ambiente, en unidades físicas.*
- INEGI (s.f.) *Ecológicas.* Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/ee/default.html#Tabulados>
- ISO (2006). *ISO 14040. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework.*
- Izábal Noguera, D. (2013) *Life Cycle Assessment of PET Bottle Recycling: A Case Study for Mexico.* Tesis para obtener el título de “Master of Science”. Diplomatistische Akademie Wien. Austria.
- Jaffe, D.; Newman, S. (2012) *A Bottle half empty: Bottled water, commodification, and contestation.* Organization & Environment 26(3), 318-335.
- Jaller, M; Sánchez, S; Green, J; Fandiño, M (2015) *Quantifying the impacts of sustainable city logistics measures in the Mexico City Metropolitan Area.* Transportation Research Procedia 12. 613-626.
- Jiménez-Corona, Aída; Gutiérrez-Cogio, Lucina; López-Moreno, S; Tapia-Conyer, R (1995) *El cólera en México. Situación epidemiológica actual.* Gac. Méd. Méx. Vol. 131 No. 3, p. 363-366. Disponible en: [https://www.anmm.org.mx/bgmm/1864\\_2007/1995-131-3-363-366.pdf](https://www.anmm.org.mx/bgmm/1864_2007/1995-131-3-363-366.pdf)

- Kan, M; Miller, S. (2022) *Environmental impact of plastic packaging of food products*. Resources, conservation & recycling. 180. 106156.
- Lagioia, G; Calabró, G; Amicarelli, V. (2012) *Empirical study of the environmental management of Italy's drinking water supply*. Resources, Conservation and Recycling, 60, 119-130.
- Lanuza García, A. (2017) *Análisis del impacto de la industria de bebidas no alcohólicas en los recursos hídricos en la Cuenca del Valle de México*. UAM. Tesis de maestría en Ciencias e Ingeniería ambientales.
- Lemus, J. (2019) *El agua o la vida. Otra guerra ha comenzado en México*. Grijalbo. México.
- Lemus, J. (2020) *Nestlé y su agua embotellada consumen la reserva hídrica de 11 regiones en ocho estados del país*. Zenzontle 400, 7 de enero de 2020. Disponible en: <http://www.zenzontle400.mx/>
- Leslie, HA; van Velzen MJM; Brandsma, SH; Vethaak, D; García-Vallejo, JJ; Lamoree, MH (2022) *Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood*. Environment International
- Liebel, S. (2021) *Groundbreaking plastic ban takes effect in Europe*. Plastic Oceans. Disponible en: [https://plasticoceans.org/plastic-ban-takes-effect-in-europe/?fbclid=IwAR1TD1sngRLvBNqV6sbVut\\_TZF3u88KH5Yq40EH4LfEK91QHC2yCSIMeR54](https://plasticoceans.org/plastic-ban-takes-effect-in-europe/?fbclid=IwAR1TD1sngRLvBNqV6sbVut_TZF3u88KH5Yq40EH4LfEK91QHC2yCSIMeR54).
- Life Cycle Initiative (2022) *What is life Cycle Thinking?* Disponible en: <https://www.lifecycleinitiative.org/starting-life-cycle-thinking/what-is-life-cycle-thinking>
- López-Morales, CA (2017a) El estado del agua en México: retos, oportunidades y perspectivas. En: *"El agua en México: Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica"*; Denzin, Taboada y Pacheco-Vega, eds. Friedrich-Ebert-Stiftung.
- López-Morales, CA; Mesa-Jurado, MA. (2017c) *Valuation of Hidden Water Ecosystem services: the replacement cost of the aquifer system in Central Mexico*. Water 9(8), 571.
- Martínez-Alier, J; Muradian, R. (2015) Taking stock: the keystones of ecological economics. En: *Handbook of Ecological Economics*. Edward Elgar Publishing.
- Masoumi, M; Rahimi, F; Akbari, S (2022) *Different methods for returning PET into the economic cycle: A review*. NanoScience Technology, Vol. 5, p.1-7.
- Matteson, M, Metivier, C. (2022) *Bussiness Ethics*. Disponible en: <https://philosophia.uncg.edu/phi361-matteson/module-5-treatment-of-employees/externalities-and-costs>.
- Merkel, A; Charles, D. (2022) *The price of plastic pollution. Social costs and corporate liabilities*. Minderoo Foundation.

- Monroy Saldívar, S. (2006) *Los residuos sólidos en el Distrito Federal: una propuesta de aprovechamiento*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Economía. Facultad de Economía, UNAM.
- Montero Contreras, D. (2015). *Trasnacionales, gobierno corporativo y agua embotellada. El negocio del siglo XXI*. Universidad Autónoma Metropolitana y Ediciones del Lirio. México
- Montero Contreras, D. (2016). *El consumo de agua embotellada en Ciudad de México desde una perspectiva institucional*. Agua y Territorio, Núm. 7, pp. 35-49. Universidad de Jaén, España.
- Mora-Reyes, JA. (2004) *El problema de la basura en Ciudad de México*. Fundación de Estudios Urbanos y Metropolitanos.
- Morales Novelo, JA; Rodríguez Tapia, L. (coord.) (2007) *Economía del Agua. Escasez del agua y su demanda doméstica e industrial en áreas urbanas*. UAM, Porrúa, H. Cámara de Diputados, LX Legislatura.
- UN (2021) *The United Nations Water Development Report 2021: Valuing Water*. UNESCO.
- Nessi, S; Rigamonti, L; Grosso, M. (2012) *LCA of waste prevention activities: a case study for drinking water in Italy*. Journal of Environmental Management 108, 73-83.
- Nestlé (2009) *Tour d'horizon with Nestlé: forget the global financial crisis, the world is running out of fresh water*. Public Library of US Diplomacy. 24 de marzo de 2009. Telegrama dirigido al Departamento de Agricultura, Departamento de Comercio, Departamento de Energía, Colectivo de ambiente, ciencia y tecnología y al secretario de estado. Disponible en: [https://wikileaks.org/plusd/cables/09BERN129\\_a.html](https://wikileaks.org/plusd/cables/09BERN129_a.html)
- Nieto Ruiz, JI (2014) *Evaluación económico-ecológica de las alternativas de manejo de los residuos sólidos urbanos para mitigar gases de efecto invernadero en Ciudad de México*. Tesis de doctorado en Economía. Instituto de Investigaciones Económicas. UNAM.
- Nygren, J; Antikainen, R. (2010) *Use of life cycle assessment (LCA) in global companies*. Reports of the Finnish Environment Institute 16.
- OECD (2016) *Extended producer responsibility. Updated guidance for efficient waste management*.
- OECD (2017) *Environmental Fiscal Reform. Progress, prospects and pitfalls*. OECD Report for the G7 environment ministers.
- OECD (2022) *Purchasing power parities (PPP)*. Disponible en: <https://data.oecd.org/conversion/purchasing-power-parities-ppp.htm>.
- Office of Governor Gavin Newsom (2022) *Governor Newsom signs legislation cutting harmful plastic pollution to protect communities, oceans and animals*. Publicado el 30 de junio de 2022. Disponible en: [www.gov.ca.gov/2022/06/30/governor-newsom-signs-legislation-cutting-harmful-plastic-pollution-to-protect-communities-oceans-and-animals/](http://www.gov.ca.gov/2022/06/30/governor-newsom-signs-legislation-cutting-harmful-plastic-pollution-to-protect-communities-oceans-and-animals/)

- ONU (2005) *Observación No. 15. Derecho al agua (artículos 11 y 12 del Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales)*. Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales. 34º período de sesiones. Disponible en: [https://conf-dts1.unog.ch/1%20SPA/Tradutek/Derechos hum Base/CESCR/00 1 obs grales Cte%20Dchos%20Ec%20Soc%20Cult.html#GEN15](https://conf-dts1.unog.ch/1%20SPA/Tradutek/Derechos%20hum%20Base/CESCR/00%201%20obs%20grales%20Cte%20Dchos%20Ec%20Soc%20Cult.html#GEN15)
- ONU (2010) *Resolución 64/292. El Derecho Humano al agua y al saneamiento*. Disponible en: [https://www.un.org/en/ga/search/view\\_doc.asp?symbol=A/RES/64/292&Lang=S](https://www.un.org/en/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/64/292&Lang=S)
- ONU (2012) *Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica para el agua*. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, División Estadística.
- ONU; Unión Europea; FAO; FMI; OCDE; Banco Mundial (2016). *Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica 2012. Marco Central*.
- Ortega Castañeda, A. (2016) *Los factores determinantes del aumento del consumo de agua embotellada en México. Análisis desde el enfoque de políticas públicas*. Tesina de Maestría en Administración y Políticas Públicas. CIDE. México.
- Pacheco-Vega, R (2015) *Agua embotellada en México: de la privatización del suministro a la mercantilización de los recursos hídricos*. Espiral, Estudios sobre Estado y Sociedad. Vol. XXII, No. 3, Mayo-agosto, 2015.
- Pacheco-Vega, R. (2017) Agua Embotellada en México: realidades, retos y perspectivas. En: *“El agua en México: Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica”*; Denzin, Taboada y Pacheco-Vega, eds. Friedrich-Ebert-Stiftung.
- Parker, J. (2010) *Case of the day: Oil prices and consumer demand*. En el curso: Introduction to Economic Analysis. Disponible en: [https://www.reed.edu/economics/parker/f10/201/cases/oil\\_demand.html#:~:text=The%20price%20elasticity%20of%20US%20demand%20for%20oil,countries%20like%20the%20United%20States%20are%20around%200.4](https://www.reed.edu/economics/parker/f10/201/cases/oil_demand.html#:~:text=The%20price%20elasticity%20of%20US%20demand%20for%20oil,countries%20like%20the%20United%20States%20are%20around%200.4)
- PEMEX (2019) *Anuario Estadístico 2018*.
- Pérez Espejo, R; Ávila Foucat, S; Aguilar Ibarra, A; (2010) *Introducción a las Economías de la Naturaleza*. Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM. México.
- Perló Cohen, M.; González Reynoso, AE (2005) *¿Guerra por el agua en el Valle de México?* Estudio sobre las relaciones hidráulicas entre el Distrito Federal y el Estado de México. UNAM, Fundación Friedrich Ebert. México.
- Petersen, K. (2020) *Microplastics in farm soils: A growing concern*. Environmental Health News. ehn.org
- PET Resin Association (2015) *The science behind PET*. Disponible en: [http://petresin.org/science\\_behindpet.asp](http://petresin.org/science_behindpet.asp)
- Pindyck, R; Rubinfeld, D. (2009) *Microeconomía*. Pearson Prentice Hall. 7ª. ed. España.
- Pindyck, R; Rubinfeld, D. (2018) *Microeconomics*. Pearson Education Limited. 9th. ed

- Pirmana, V; Alisjahbana, AS; Yusuf, AA; Hoekstra, R; Tukker, A. (2021) *Environmental costs assessment for improved environmental-economic account for Indonesia*. Journal of Cleaner Production. 280, 124521.
- Plastics Europe (s.f.) *Life Cycle Thinking*. Disponible en: <https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/life-cycle-thinking/?msclkid=b30d6cbac04a11ec8962078b7eb79fe0>
- PNUMA (2021). *En estado de negligencia: el impacto de la basura marina y la contaminación por plásticos en la justicia ambiental*. Nairobi.
- Quentin Grafton, R; Adamowics, W; Dupont, D; Nelson, H; Hill, R; Renzatti, S. (2004) *The economics of the environment and natural resources*. Blackwell Publishing.
- Quintana Noriega, MC (2016) *Potencial de los sitios para la disposición final de los residuos sólidos urbanos como reservas de suelo para la ciudad*. Tesis de Maestría en Urbanismo. UNAM.
- Rebolledo López, D.C. (2011) *Manual para la valoración social de impactos y daños ambientales de actividades agrícolas*. FAO.
- Reveles, C (2018) *Ciudad de México, al borde del colapso por la generación excesiva de basura*. Animal político, 20 de agosto de 2018. Disponible en: <https://www.animalpolitico.com/2018/08/Ciudad-de-México-colapso-generacion-excesiva-basura/>
- Revollo-Fernández, D; Rodríguez-Tapia, L (2021) *Unequal access to water and its affordability for households in Mexico*. Journal of Poverty.
- Reyez, J. (2017) *La crisis del agua, detonante de conflicto social*. 8 de agosto, 2017. Disponible en: <https://www.contralinea.com.mx/archivo-revista/2017/08/08/la-crisis-del-agua-detonante-de-conflicto-social/>
- Rivas, M. (2019) *La crisis de la contaminación plástica*. Heinrich Böll Stiftung, Ciudad de México. 16 de julio de 2019.
- Rodríguez, D. (2017) *Bonafont adquiere 339 vehículos HINO*. Revista Transportes y Turismo. Disponible en: <https://www.tyt.com.mx/nota/bonafont-adquiere-339-vehiculos-hino/>
- Rodríguez-Tapia, L; Revollo-Fernández, D; Morales-Novelo, J. (2017) *Household's perception of water quality and willingness to pay for clean water in Mexico City*. Economies, 5,12.
- Rodwan, J. (2011) *Bottled Water 2010: The recovery begins*. Bottled Water Reporter, Apr-May, p. 10-17. Disponible en: [www.bottledwater.org](http://www.bottledwater.org)
- Rodwan, J. (2017) *Bottled Water 2016: No. 1 & Growing*. Bottled Water Reporter, Apr-May, p. 12-21. Disponible en: [www.bottledwater.org](http://www.bottledwater.org)
- Rodwan, J. (2021) *Bottled water 2020: Continued upward movement*. Bottled Water Reporter, Jul-Aug, p. 10-19. Disponible en: [www.bottledwater.org](http://www.bottledwater.org)

- Ryan, P. (2015) *A Brief history of Marine Litter Research*. En *Marine Anthropogenic Litter*, Bergmann *et al*, eds. University of Cape Town, South Africa.
- Sánchez Villavicencio, R. (2016). *Agua embotellada: identificación de impactos ambientales*. Tesis de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- SEDEMA (2016) *Campaña Sin moño y sin bolsita, por favor*. Disponible en: [http://data.sedema.Ciudad de México.gob.mx/sin-mono-sin-bolsita/costo\\_basura.html](http://data.sedema.Ciudad de México.gob.mx/sin-mono-sin-bolsita/costo_basura.html)
- SEDEMCDMX (2021) *Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2018. Contaminantes criterio, tóxicos y gases y compuestos de efecto invernadero*. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Proyectos de Calidad del Aire.
- Sieverding, H; Bailey, L; Hengen, T; Clay, D; Stone, J (2015) *Meta-analysis of soybean-based biodiesel*. *Journal of Environmental Quality*. 44:1038-1048.
- Simon, M. (2020) *Plastic rain is the new acid rain*. Disponible en: <https://www.wired.com/story/plastic-rain-is-the-new-acid-rain>
- Simon, N; Schulte, ML. (2017) *Stopping global plastic pollution: the case for an international convention*. Heinrich Böll Stiftung. Publication series Ecology. Vol. 43.
- Sirikijpanichkul, A; Iyengar, M; Ferreira, L (2006) *Valuing Air Quality Impacts of Transportation a Review of Literature*. School of Urban Development, Queensland University of Technology, Brisbane, Australia.
- SMAGDF (2011) *Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal 2010*. Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.
- SMAGDF (2014) *Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal 2013*. Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.
- SMAGCIUDAD DE MÉXICO (2016) *Inventario de Residuos Sólidos de Ciudad de México 2015*. Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de Ciudad de México.
- SMAGCIUDAD DE MÉXICO (2021) *Inventario de Residuos Sólidos de Ciudad de México 2020*. Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de Ciudad de México.
- Soto-Montes de Oca, G. (2007) *Agua: tarifas. Escasez y sustentabilidad de las megaciudades; ¿cuánto están dispuestos a pagar los habitantes de Ciudad de México?* SACMEX, UI, CEJA, PAOT. México
- Stapleton, PA (2021) *Microplastics and nanoplastics transfer, accumulation, and toxicity in humans*. *Current Opinion in Toxicology*. 28, P. 62-69.
- Statista (s.f.) Disponible en: <https://www.statista.com>
- Steen, B. (2016) *Calculation of monetary values of environmental impacts from emissions and resource use*. *Journal of Sustainable Development*, Vol. 9, no. 6.

- Stypka, T; Berbeka, K. (2014) *Drinking Water Consumption in Cracow – an Assessment from a Sustainable Development Perspective*. Problems of sustainable development. Vol. 9, no. 2, 121-130.
- Sustainability Impact Metrics; Delft University of Technology (s.f.) *Frequently asked questions*. Disponible en: <https://www.ecocostsvalue.com/frequently-asked-questions/#toggle-id-4>
- Téllez Maldonado, A. (2012). *La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos: una nueva aproximación al análisis narrativo de política pública en Bogotá*. Tesis para optar por el título de Magister en Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia.
- Ter Halle, A; Ghiglione, JF (2021) *Nanoplastics: A complex, polluting terra incógnita*. Environmental Science and Technology. 55, p.14466-14469.
- The Pew Charitable Trust; SYSTEMIQ (2020) *Breaking the plastic wave. A comprehensive assessment of pathways towards stopping ocean plastic pollution*.
- Tietenberg, T; Lewis, L. (2012) *Environmental & Natural Resource Economics*. Pearson. 9a. edición. USA.
- Trasande, L; Liu, B; Bao, W. (2022) *Phtalates and attributable mortality: a population-based longitudinal cohort study and cost analysis*. Environmental Pollution. 292, 118021.
- TresPM.mx (2021) *Camiones repartidores sustentables llegan a México de la mano de Grupo Modelo*. Disponible en: [www.trespm.mx/eco/camiones-repartidores-sustentables-llegan-a-mexico-de-la-mano-de-grupo-modelo](http://www.trespm.mx/eco/camiones-repartidores-sustentables-llegan-a-mexico-de-la-mano-de-grupo-modelo)
- Tsirimokos, C. (2011) *Price and Income Elasticities of crude oil demand*. Swedish University of Agricultural Sciences. Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences. Department of Economics. Tesis de Maestría.
- UN (1987) *Report of the World Commission on Environment and Development: our common future*.
- UNEP (2010) *Assessing the environmental impacts of consumption and production: priority products and materials*.
- UNEP (2012) *Greening the economy through life cycle thinking. Ten years of the UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. Phase III 2012-2017*.
- UNEP (2014) *Valuing Plastics: The Business Case for Measuring, Managing and Disclosing Plastic Use in the Consumer Goods Industry*.
- UNEP (2017) *Towards a pollution-free planet. United Nations Environment Assembly of the United Nations Environment Programme*
- UNEP (2018) *Our planet is drowning in plastic pollution – it's time for change!* Disponible en: <https://www.unep.org/interactive/beat-plastic-pollution>

- UNEP (2019) *The new plastic economy global commitment. 2019 Progress Report*. UNEP & Ellen McArthur Foundation.
- UNEP (2021) *Urge acelerar acción para frenar la contaminación por plásticos*. Disponible en: [https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/urge-acelerar-accion-para-frenar-la-contaminacion-por-plasticos?fbclid=IwAR1lt4V--5N\\_2V7GNr4JRTzv7R\\_8iwgD8eE4B4jpWrszJo5hqFDS6USGhuE](https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/urge-acelerar-accion-para-frenar-la-contaminacion-por-plasticos?fbclid=IwAR1lt4V--5N_2V7GNr4JRTzv7R_8iwgD8eE4B4jpWrszJo5hqFDS6USGhuE)
- UNEP (2021b) *Single-use plastic tableware and its alternatives – Recommendations from Life Cycle Assessment*.
- Vogtländer, J. (2010) *LCA-based assessment of sustainability: the Eco-costs/Value Ratio (EVR)*. Sustainable Design Series of the Delft University of Technology.
- World Health Organization (2019) *Microplastics in drinking-water*.
- World Economic Forum, Ellen MacArthur Foundation and McKinsey & Company (2016). *The New Plastics Economy — Rethinking the future of plastics*.
- Yacine Sanogho, M. (2022) *"Nestlé and the Right to Water"* The Journal of International Relations, Peace Studies, and Development: Vol. 7: Iss. 1, Article 8.
- Zollinger, M; Pike, A; Humbert, S (2017) *Life Cycle inventory and environmental footprint of bottled water for the North American market*. IBWA.
- Zumsteg, J; Cooper, J; Noon, M (2012) *Systematic Review checklist. A standardized technique for assessing and reporting reviews of Life Cycle Assessment Data*. Journal of Industrial Ecology. Vol 19, Num. S1.

## VII. ANEXOS

---

### Anexo I

- i. Déficit: resulta de considerar la recarga media anual y el volumen de agua subterránea concesionada inscritas en el REPDA. En este caso, el Déficit reportado para la RHA XIII (Región hidrológica-administrativa), a la cual pertenece la Ciudad de México, es de 591.2E6m<sup>3</sup>/año (DOF, 2016).
- ii. El volumen total de agua renovable de una cuenca se llama Disponibilidad Natural Base Media de Agua (DNBM) y es una magnitud estable. Para la CVM (Cuenca del Valle de México) en 2015 fue de 1922.8 hm<sup>3</sup> y 88.8 hm<sup>3</sup>/persona, lo que hace que esta cuenca esté catalogada como una zona de escasez hídrica absoluta, según el Índice de Falkenmark (Lanuzza García, 2017). El volumen de agua renovable per cápita de la RHA XIII, Aguas del Valle de México para 2017, que es de 3401 hm<sup>3</sup> y 144 m<sup>3</sup>/año por persona; para la Ciudad de México en específico, el agua renovable para 2017 es de 644 hm<sup>3</sup>, y 55 hm<sup>3</sup>/persona, la más baja de todo el país (CONAGUA, 2018). El DOF (2016) reporta que, para el Acuífero de la Zona Metropolitana de Ciudad de México el agua renovable es de 512.8 hm<sup>3</sup>.
- iii. Grado de presión hídrico o índice de explotación hídrica: es la proporción de volumen de agua concesionada respecto al total de agua renovable. El grado de presión sobre el recurso hídrico en la región hidrológica-administrativa del Valle de México ha aumentado de forma constante; en 2011 era de 132.9% (CONAGUA, 2012), y en 2017 había aumentado hasta 141.4% (CONAGUA, 2018), esto es, para 2017 se había extraído 41.4% más agua de la que se recarga anualmente; y esto se clasifica como grado de presión Muy Alto. Para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México en 2017, el agua renovable fue de 644 hm<sup>3</sup> y el agua concesionada fue 1122.2 hm<sup>3</sup>, por lo que el grado de presión hídrico es 174, 74% más de la recarga anual (CONAGUA; 2018; López-Morales, 2017). Morales Novelo et al (2007) calculan que, de continuar con la dinámica, para 2030 la sobreexplotación de los acuíferos podría llegar a 1471 hm<sup>3</sup>; los efectos colaterales, entre ellos el hundimiento de los asentamientos urbanos, son impredecibles.
- iv. Disponibilidad de agua renovable per cápita: México está considerado un país con baja disponibilidad de agua; se pasó de una disponibilidad de 15000m<sup>3</sup> por persona en 1950, a 3692 m<sup>3</sup> por persona en 2015 (Gaceta UNAM, 29 de octubre de 2018) y 3656 m<sup>3</sup>/persona en 2017 (CONAGUA, 2018). CONAGUA (2012) estima que en 2030 esta cifra puede ser tan baja como 1000 m<sup>3</sup> para algunas zonas, lo que se considera una condición de escasez grave, y esto puede darse en regiones como Baja California y el Valle de México. Para 2017, la disponibilidad de agua renovable per cápita de la Ciudad de México fue de 55 m<sup>3</sup>/persona-año (CONAGUA, 2018).
- v. Agua concesionada: CONAGUA (2018) registra el volumen de agua para usos consuntivos, para el país en 2017 fue de 87842 hm<sup>3</sup> y para Ciudad de México, 1122.2 hm<sup>3</sup>.

- vi. Disponibilidad media anual de agua: es un indicador que mide la cantidad de agua que se puede extraer de un cuerpo de agua en determinado momento y justifica o no el otorgamiento de los derechos o concesiones; está sujeta a la NOM-011-CNA-2015. Lanuza García (2017) calcula la disponibilidad media anual de agua en la CVM y obtiene que es 412.3 Hm<sup>3</sup>/año, de los cuales 71.43 hm<sup>3</sup>/año provienen de la cuenca subterránea y 340.9 provienen de la cuenca superficial. Cabe señalar que la disponibilidad media anual para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, tanto superficial como subterránea, es cero.
- vii. Grado de sobreexplotación de los acuíferos: Lanuza García (2017) presenta resultados de la evaluación del grado de sobreexplotación<sup>52</sup> de los acuíferos de la CVM. Se observa que la Zona Metropolitana de la Ciudad de México es la región del país que presenta mayor problemática respecto al agua pues, al tener un grado de sobreexplotación mayor de 115%.

---

<sup>52</sup> El grado de sobreexplotación se define como:  $(\text{Volumen de recarga} - \text{volumen de extracción}) / (\text{volumen de recarga})$

## Anexo II

Tabla 43 Factores de conversión: PIB a precio corriente y constante de 2013, INPC, PPC

Año	PIB Mex (MM pesos) (1)		INPC Mex (2)	PPC Mex Peso/dólar (4)	PPC UE euro/dólar (4)
	Valor corriente	Valor constante 2013			
2003	7,868,810	13,061,719	54.2826		
2004	8,828,367	13,573,815	56.8276		
2005	9,562,648	13,887,073	59.0939		
2006	10,630,939	14,511,307	61.2387		
2007	11,504,076	14,843,826	63.6679	7.37	0.79
2008	12,353,845	15,013,578	66.9309		
2009	12,162,763	14,219,998	70.4765		
2010	13,366,377	14,947,795	73.4060		
2011	14,665,576	15,495,334	75.9072		
2012	15,817,755	16,059,724	79.0281		
2013	16,277,187	16,277,187	82.0364	7.884	
2014	17,473,842	16,733,655	85.3329		
2015	18,551,459	17,283,856	87.6546	8.328	
2016	20,118,101	17,786,911	90.1279	8.446	
2017	21,911,894	18,163,652	95.5730		
2018	23,491,507	18,551,620	100.255		

Fuente: (1) INEGI, (2) [elcontribuyente.mx](http://elcontribuyente.mx) consultado el 20/5/2020, (4) OECD, 2022 consultado el 9/6/2022

Tabla 44 Costo del agotamiento del petróleo para México actualizado a valores de 2013, 2003-2018, en MMpesos

Año	Costo del Agotamiento del petróleo, valores corrientes MMpesos	Costo del Agotamiento del petróleo, valores constantes de 2013 MMpesos	Costo del Agotamiento unitario del petróleo, pesos/barril
2003	84,604	140,437	88.492
2004	69,519	106,887	66.348
2005	76,978	111,789	69.694
2006	121,038	165,218	102.112
2007	88,626	114,355	71.338
2008	175,899	213,769	147.33
2009	150,931	176,460	128.055
2010	175,686	196,472	141.960
2011	179,253	189,395	139.466
2012	232,940	236,503	174.799
2013	232,988	232,988	174.785
2014	130,056	124,547	96.473
2015	80,395	74,902	62.784
2016	78,620	69,510	62.453
2017	62,632	51,918	51.815
2018	71,937	56,810	61.416

Fuente: INEGI, diversos años.

Tabla 45 Costo del agotamiento de recursos y contaminación, 2003-2018, valores de 2013

Año	Valor por unidad de masa del Agotamiento		Valor por unidad de masa de la contaminación				
	Petróleo	Agua subterránea	RSU	Atmosférica fuentes móviles	Atmosférica fuentes fijas	Suelo	Agua
	Pesos/barril	Pesos/m <sup>3</sup>	Pesos/kg	Pesos/kg CO <sub>2</sub> eq	Pesos/kg CO <sub>2</sub> eq	Pesos/km <sup>2</sup>	Pesos/m <sup>3</sup>
2003	88.492	3.838	1.206	46.1065	0.59704	1093.12	2.5189
2004	66.348	3.661	1.174	44.3389	0.53904	982.84	2.4065
2005	69.694	4.155	1.160	43.0970	0.54849	977.019	2.0840
2006	102.112	4.326	1.166	39.8678	0.54400	975.231	1.9543
2007	71.338	3.913	1.144	38.9264	0.54027	1074.873	1.7745
2008	147.33	3.578	1.131	36.4524	0.50346	1166.486	1.0585
2009	128.055	4.260	1.163	36.1356	0.48478	968.583	1.2531
2010	141.960	4.392	1.161	37.7962	0.54150	926.554	1.3343
2011	139.466	4.509	1.149	35.4358	0.51270	958.058	1.3453
2012	174.799	4.627	1.156	32.2715	0.50902	1006.447	1.3244
2013	174.785	4.935	1.168	31.7573	0.53262	1060.161	1.4003
2014	96.473	5.041	1.148	35.9076	0.54540	1049.821	1.4370
2015	62.784	5.030	1.159	37.0806	0.55184	1115.626	1.4729
2016	62.453	5.241	1.152	37.2687	0.55029	1119.038	1.5314
2017	51.815	6.252	1.146	37.7513	0.60810	1137.866	1.6184
2018	61.416	6.549	1.155	37.3035	0.62169	1202.687	1.5068
Prom	102.457	4.644	1.1586	37.9686	0.54564	1050.900	1.6263
Gráfica de Tendencia							

Fuente: Construcción propia a partir de datos de INEGI

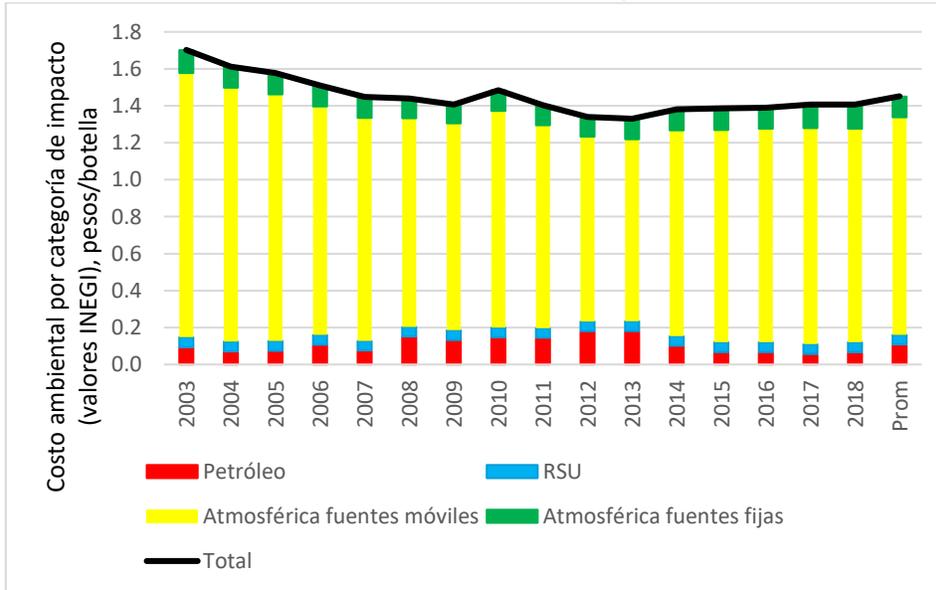
### Anexo III

Tabla 46 Costos ambientales por categoría de impacto, 2003-2018, (pesos/botella)

Año	Costo del Agotamiento		Valor por unidad de masa de la contaminación					Total
	Petróleo	Agua subterránea	RSU	Atmosférica fuentes móviles	Atmosférica fuentes fijas	Suelo	Agua	
2003	0.0896	0.0032	0.0546	1.4293	0.1243	1.26E-05	0.0012	1.7023
2004	0.0672	0.0031	0.0532	1.3745	0.1122	1.14E-05	0.0012	1.6113
2005	0.0705	0.0035	0.0525	1.3360	0.1142	1.13E-05	0.0010	1.5778
2006	0.1034	0.0036	0.0528	1.2359	0.1133	1.13E-05	0.0010	1.5099
2007	0.0722	0.0033	0.0518	1.2067	0.1125	1.24E-05	0.0009	1.4474
2008	0.1491	0.0030	0.0512	1.1300	0.1048	1.35E-05	0.0005	1.4387
2009	0.1296	0.0036	0.0527	1.1202	0.1009	1.12E-05	0.0006	1.4076
2010	0.1437	0.0037	0.0526	1.1717	0.1127	1.07E-05	0.0007	1.4851
2011	0.1412	0.0038	0.0520	1.0985	0.1067	1.11E-05	0.0007	1.4029
2012	0.1769	0.0039	0.0524	1.0004	0.1060	1.16E-05	0.0006	1.3402
2013	0.1769	0.0042	0.0529	0.9845	0.1109	1.23E-05	0.0007	1.3300
2014	0.0976	0.0042	0.0520	1.1131	0.1136	1.21E-05	0.0007	1.3813
2015	0.0635	0.0042	0.0525	1.1495	0.1149	1.29E-05	0.0007	1.3854
2016	0.0632	0.0044	0.0522	1.1553	0.1146	1.29E-05	0.0007	1.3905
2017	0.0524	0.0053	0.0519	1.1703	0.1266	1.32E-05	0.0008	1.4073
2018	0.0622	0.0055	0.0523	1.1564	0.1294	1.39E-05	0.0007	1.4066
Prom	0.1037	0.0039	0.0525	1.1770	0.1136	1.22E-05	0.0008	1.4515

Fuente: cálculos propios a partir de información del INEGI, diversos años

Ilustración 11 Costos ambientales anuales del INEGI por botella



## Anexo IV

Tabla 47 Resumen de costos ambientales por cada botella de agua, según información de Dettore (2009)

Categoría de Impacto			Costo por impacto ambiental (\$/botella)	%	%
Uso y agotamiento de recursos	No renovables	Petróleo	0.9843	37.4	37.9
		Agua subterránea	0.01001	0.38	
	Renovables	Agua superficial	0.001	0.04	
Contaminación	Residuos sólidos		0.02808	1.07	62.1
	Aire	Fuentes fijas	0.10508	3.99	
		Fuentes móviles	1.4986	57.01	
	Suelo		0	0	
	Agua		0.001336	0.051	
	TOTAL		2.6284		

Ilustración 12 Cálculo del costo ambiental de cada botella de agua, por cada autor

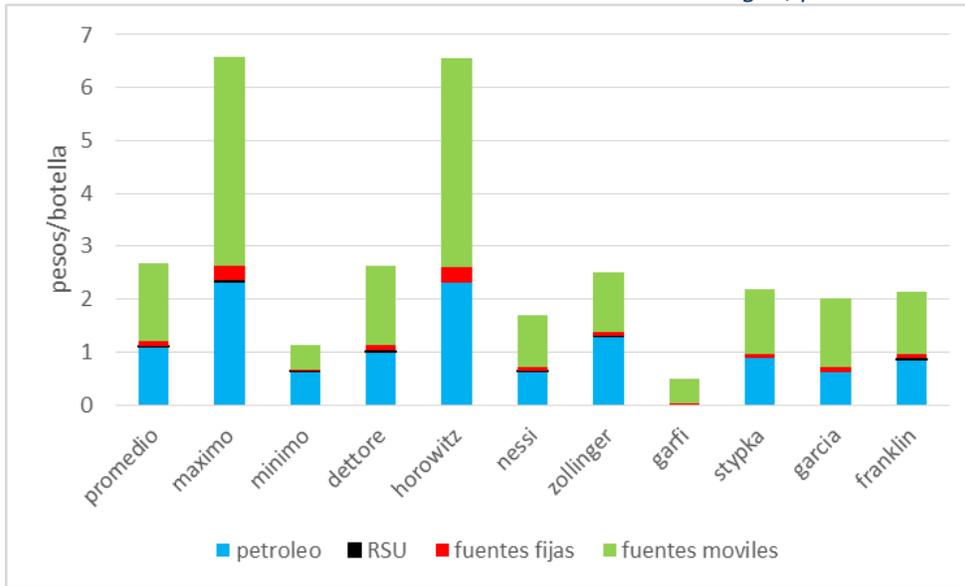


Tabla 48 Costos ambientales promedio del **PET** por categoría de impacto, con información de Dettore (2009)

Categoría de Impacto		Fuente	Costo por unidad de masa (\$/botella)	% PET	Costo atribuible al PET (\$/botella)	%
Uso y agotamiento de recursos	No renovables	Petróleo	0.9843	83.528	0.8222	70.0
		Agua subterránea	0.01001	0	0	0
	Renovables	Agua superficial	0.001	75.5	0.00076	0.06
Remediación de la Contaminación		Residuos sólidos	0.02808	96.1983	0.02701	2.3
	Aire	Fuentes fijas	0.10508	94.55	0.09935	8.46
		Fuentes móviles	1.4986	14.93	0.22374	19.05
	Suelo	Proceso	0	0	0	0
	Agua	Proceso	0.001336	100	0.00134	0.11
	TOTAL			2.62842		1.17436

Tabla 49 Costos ambientales del **agua bebible** por categoría de impacto, con información de Dettore (2009)

Categoría de Impacto		Fuente	Costo por unidad de masa (\$/botella)	% Agua	Costo atribuible al agua (\$/botella)	%
Uso y agotamiento de recursos	No renovables	Petróleo	0.9843	16.472	0.162	11.2
		Agua subterránea	0.01001	100	0.01001	0.69
	Renovables	Agua superficial	0.001	24.5	0.000245	0.02
Remediación de la Contaminación		Residuos sólidos	0.02808	3.7517	0.00105	0.07
	Aire	Fuentes fijas	0.10508	5.45	0.00573	0.39
		Fuentes móviles	1.4986	85.07	1.2749	87.7
	Suelo	Proceso	0	0	0	0
	Agua	Proceso	0.001336	0	0	0
	TOTAL			2.62842		1.45403