



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL – SUSTANCIAS Y RESIDUOS PELIGROSOS

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DEL SISTEMA DE GESTIÓN HÍDRICA DE LA CIUDAD DE
MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

BIÓL. ALEJANDRO FRÍAS VILLEGAS

TUTOR PRINCIPAL

DRA. LEONOR PATRICIA GÜERECA HERNÁNDEZ
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

COMITÉ TUTOR:

M.I. ALBA BEATRIZ VÁZQUEZ GONZÁLEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

DR. RAFAEL CARMONA PAREDES
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, JUNIO DE 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Noyola Robles Adalberto
Secretario: M.I. Vázquez González Alba Beatriz
Vocal: Dr. Rieradevall Pons Joan
1^{er.} Suplente: Dr. Carmona Paredes Rafael Bernardo
2^{d o.} Suplente: Dra. Güereca Hernández Leonor P.

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería de la UNAM

TUTOR DE TESIS:

Dra. Leonor Patricia Güereca Hernández

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

Académicos

A la Dra. Leonor Patricia Güereca Hernández por la dirección del presente trabajo.

A la M. en I. Alba Vázquez González y al Dr. Rafael Carmona Paredes por su participación como miembros del comité tutor que orientó el desarrollo de esta investigación.

Al Dr. Adalberto Noyola Robles y al Dr. Joan Rieradevall Pons por la revisión exhaustiva del manuscrito y sus comentarios.

Institucionales

Al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, en cuyas instalaciones se realizó el trabajo de gabinete de este proyecto.

Al proyecto ACUA (Análisis de Ciclo de Vida del Ciclo Urbano del Agua en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México) por el financiamiento otorgado para la realización de este trabajo.

Al Ing. en Control David Alejandro Fuentes Vázquez, Auxiliar en la Oficina de Energía Eléctrica del SACM por su invaluable apoyo para la obtención de información sobre consumo de energía eléctrica del Sistema.

Al Ing. David Vilchis de Jesús, Residente Especializado de Operación y Conservación del OCAVM por su gran apoyo en la obtención de la información técnica relativa a la operación del Sistema Cutzamala.

Al Lic. Raúl Romero González, Jefe de la Oficina Administrativa de la Dirección de Agua Potable y Potabilización, SACM, por su gran apoyo para la obtención de la información oficial pertinente y la gestión de autorizaciones para visitar las instalaciones del Sistema.

Al Ing. José Galván Gómez, Jefe de la Subdirección de Tratamiento y Reúso, SACM por el apoyo brindado para la obtención de información sobre tratamiento de agua.

Al Lic. Abdías Montoya Ayala, Residente General de Operación del Sistema Cutzamala por las facilidades brindadas para el acceso a las instalaciones del Sistema.

A los funcionarios y trabajadores de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM) y del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM) por su apoyo, colaboración y por compartir sus valiosos conocimientos durante la realización del presente estudio.

A la Ing. Maribel García Sánchez por su apoyo en las visitas a las instalaciones del Sistema.

DEDICATORIA

A mis padres Gloria Villegas y Jorge Frías por su cariño, guía e infinita paciencia, por su gran apoyo incondicional. Por todo lo que sólo ellos y yo sabemos.....

A Patricia Frías (Paty) por su amor, comprensión y apoyo en esta etapa, por todo lo que hemos compartido en este sinuoso camino.

Índice

ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS	10
ACRÓNIMOS	11
RESUMEN.....	12
1. Introducción	14
2. Marco Teórico	19
2.1 La Ciudad de México (CDMX)	19
2.1.1 El Medio Físico.....	19
2.1.2 El Fenómeno Metropolitano	25
2.2 Gestión del Agua en la Ciudad de México: Situación Actual.....	28
2.3 El Agua en la Ciudad de México	32
2.3.1 Captación y Transporte	32
2.3.2 Potabilización y Distribución	38
2.3.3 Uso.....	42
2.3.4 Recolección y Tratamiento.....	43
2.3.5 Reúso y Vertido en el Cuerpo Receptor	50
2.3.6 Panorama General.....	52
2.4 Problemática del Agua en la CDMX.....	54
2.5 Generación de Energía Eléctrica en México.....	61
2.6 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	63
2.7 Categorías de impacto seleccionadas	68
2.8 Antecedentes: Estudios de ACV en sistemas de agua urbanos.....	82
2.9 Análisis de Ciclo de Vida del Sistema de Gestión Hídrica de la Ciudad de México	85
3. Objetivos	87
3.1 Objetivo General	87
3.2 Objetivos Particulares	87
4. Metodología	88
4.1 Definición de Objetivos y Alcance.....	91
Objetivo de ACV del sistema de gestión hídrica de la Ciudad de México	91
Función del Sistema	91
Alcance	91

4.2	Descripción del Sistema	94
4.3	Metodología para la evaluación de impacto.....	95
5.	Análisis (Integración) del Inventario	100
	Consumo energético por etapa.....	100
	Etapa: Captación	101
	Etapa: Transporte.....	102
	Etapa: Potabilización	103
	Etapa: Distribución	104
	Etapa: Uso.....	105
	Etapa: Recolección.....	105
	Etapa: Tratamiento.....	106
	Etapa: Reúso.....	107
	Etapa: Vertido en el cuerpo receptor	108
6.	Resultados y Discusión: Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida	110
6.1	Cambio Climático	113
6.2	Reducción de la capa de ozono.....	116
6.3	Toxicidad humana	118
6.4	Formación de oxidantes fotoquímicos.....	120
6.5	Acidificación terrestre	121
6.6	Eutrofización del agua dulce	123
6.7	Ecotoxicidad terrestre	125
6.8	Agotamiento del agua	127
6.9	Agotamiento de Metales.....	129
6.10	Agotamiento de los combustibles fósiles.....	131
	CONSIDERACIONES FINALES	133
7.	Conclusiones.....	135
8.	Referencias	138
	ANEXO I. -Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).....	151
	ANEXO II. Relación de Visitas a las Instalaciones Operadas por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México y la Comisión Nacional del Agua.....	153
	ANEXO III. Información Utilizada y Procedimientos de Cálculo para Obtener el Consumo de Energía Eléctrica del Sistema de Gestión Hídrica de la Ciudad de México	155

ANEXO IV. Cálculo de los valores utilizados en el inventario para la etapa de Recolección.....	159
ANEXO V. Cálculo de los valores utilizados en el inventario para la etapa de Tratamiento.....	162
ANEXO VI. Cálculo de los valores utilizados en el inventario para la etapa de Vertido en el Cuerpo Receptor.	165

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.- Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México	20
Figura 2.2.-Precipitación media mensual en la CDMX para el periodo 2010-2017	21
Figura 2.3.- Mapa Hidrológico de la Ciudad de México.....	23
Figura 2.4.- Expansión de la Ciudad de México y Obras Hidráulicas que Implican el Entubamiento de Ríos.....	24
Figura 2.5.-Organigrama Resumido del Sistema de Aguas de la Ciudad de México	30
Figura 2.6 .- Regiones Hidrológico Administrativas de México.....	31
Figura 2.7.- Fuentes de Abastecimiento de Agua para la Ciudad de México	32
Figura 2.8.- Perfil del Sistema Cutzamala.....	33
Figura 2.9.- Ubicación de los Ramales del Sistema de Pozos Plan de Acción Inmediata (PAI)	36
Figura 2.10.- Ubicación del Macrocircuito y de Acuaférico.....	41
Figura 2.11.- Usos del Agua en la Ciudad de México	42
Figura 2.12.- Tajo de Nochistongo (Ca. 1920).....	43
Figura 2.13.- Gran Canal de Desagüe	44
Figura 2.14.- Vista Aérea del Gran Canal de Desagüe	45
Figura 2.15.- Sistema de Drenaje Profundo	47
Figura 2.16.- Túnel Emisor Oriente	49
Figura 2.17.- Puntos de Descarga de Aguas Residuales Delegacionales sin Tratamiento	51
Figura 2.18.- Etapas y flujos principales del sistema de gestión hídrica de la Ciudad de México....	53
Figura 2.19.- Usuarios de Energía Eléctrica por Delegación para el Bombeo de Aguas Potables y Negras	56
Figura 2.20.- Volumen de las Ventas de Energía Eléctrica por Delegación para el Bombeo de Aguas Potables y Negras.....	56
Figura 2.21.- Descarga de Aguas Negras desde la Ciudad de México Hacia el Valle del Mezquital, Hidalgo.....	60
Figura 2.22.- Generación de energía eléctrica por tipo de tecnología (2015)	62
Figura 2.23.- Esquema de Análisis del Inventario del Ciclo de Vida	67
Figura 2.24.- Fases de un Análisis de Ciclo de Vida	67
Figura 4.1.- Diagrama de Flujo de las Etapas de la Investigación	88
Figura 4.2.- Límites del Sistema para el ACV del Sistema de Gestión Hídrica de la Ciudad de México.....	93
Figura 6.1.- Aportación Porcentual por Proceso para Cada Categoría de Impacto.....	111
Figura 6.2.- Aportación Porcentual por Proceso para Cada Categoría de Impacto con Valores Normalizados	112
Figura 6.3.- Contribuciones a la Categoría de Cambio Climático	115
Figura 6.4.- Contribuciones a la Categoría de Reducción de la Capa de Ozono.....	116
Figura 6.5 .-Contribuciones a la Categoría de Toxicidad Humana	118
Figura 6.6.- Contribuciones a la Categoría de Oxidantes Fotoquímicos.....	120
Figura 6.7.- Contribuciones al Categoría de Acidificación Terrestre	122

Figura 6.8.- Contribuciones a la Categoría de Eutrofización del Agua Dulce	124
Figura 6.9.- Contribuciones a la Categoría de Ecotoxicidad Terrestre	126
Figura 6.10.- Contribuciones a la Categoría de Agotamiento del Agua	128
Figura 6.11.- Contribuciones a la Categoría de Agotamiento de los Metales	130
Figura 6.12.- Contribuciones a la Categoría de Agotamiento de Combustibles Fósiles	132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.- Cuerpos de Agua de la Ciudad de México.....	22
Tabla 2.2.- Municipios y Delegaciones que Integran la ZMVM	27
Tabla 2.3.- Ramales del Sistema de Pozos Plan de Acción Inmediata (PAI)	35
Tabla 2.4.- Fuentes de Abastecimiento de Agua a la Ciudad de México.....	38
Tabla 2.5.- Caracterización del Sistema de Drenaje Profundo.....	46
Tabla 2.6.- Tecnologías convencionales para la producción de energía eléctrica utilizadas en México (2015).....	63
Tabla 2.7.- Gases que Contribuyen al Calentamiento Global	69
Tabla 2.8.- Factores de Destino (factores de caracterización de punto medio) y potenciales de eutrofización de agua dulce.....	77
Tabla 4.1.- Etapas y Procesos que Integran el ACV del Sistema de Gestión Hídrica de la Ciudad de México.....	94
Tabla 4.2.- Categorías de Impacto a Analizar (ReCiPe v 1.12)	98
Tabla 4.3.- Perdidas Físicas en el Sistema de Gestión Hídrica de la Ciudad de México	99
Tabla 5.1.- Consumo de Energía Eléctrica del Sistema de Gestión Hídrica de la Ciudad de México	100
Tabla 5.2.- Inventario para la Etapa de Captación	101
Tabla 5.3.- Inventario para la Etapa de Transporte	102
Tabla 5.4.- Inventario para la Etapa de Potabilización.....	103
Tabla 5.5.- Inventario para la Etapa de Distribución	104
Tabla 5.6.- Inventario para la Etapa de Uso	105
Tabla 5.7.- Inventario para la Etapa de Recolección.....	105
Tabla 5.8.- Inventario para la Etapa de Tratamiento.....	106
Tabla 5.9.- Inventario para la Etapa de Reúso	107
Tabla 5.10.- Inventario para la Etapa de Vertido en el Cuerpo Receptor	109

ACRÓNIMOS

ACV = Análisis de Ciclo de Vida

CDMX = Ciudad de México

CONAGUA = Comisión Nacional del Agua

COVNM = Compuestos Orgánicos Volátiles, excluyendo al metano

DBO = Demanda Bioquímica de Oxígeno

DQO = Demanda Química de Oxígeno

EICV = Evaluación del impacto de ciclo de vida

ICV = Inventario de Ciclo de Vida

IPCC = Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático

NMVOC = Compuestos Orgánicos Volátiles, excluyendo al metano

OCAVM = Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México

PAI = Plan de Acción Inmediata

PTAR = Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

RHA = Región Hidrológico-Administrativa

SACM = Sistema de Aguas de la Ciudad de México

SACMEX = Sistema de Aguas de la Ciudad de México

SEMARNAT = Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

TEO = Túnel Emisor Oriente

UNFCCC = Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático

ZMVM = Zona Metropolitana del Valle de México

RESUMEN

La Ciudad de México (CDMX), al igual que otras ciudades del mundo, enfrenta problemas relacionados con el abastecimiento de agua. Las fuentes locales de suministro, además de estar sobreexplotadas, resultan insuficientes para cubrir la demanda. En el mismo sentido, la situación geográfica de la ciudad, la cual se encuentra a una altitud promedio de 2 250 msnm, implica un reto de ingeniería, en virtud de que las operaciones necesarias para el suministro de agua potable, así como el desalojo de aguas residuales, representan un consumo energético considerable.

El sistema de gestión hídrica de la Ciudad de México fue estudiado utilizando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), para identificar los impactos ambientales que genera. Para tal fin se consideraron 9 etapas: captación, transporte, potabilización, distribución, uso, recogida, tratamiento, reúso y vertido en el cuerpo receptor. El periodo de estudio corresponde al año 2015.

La información utilizada para realizar el ACV proviene de fuentes oficiales, tales como el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), además de informes gubernamentales y estadísticas oficiales. Asimismo, se utilizó información proveniente de artículos de investigación, manuales de operación y tesis.

La construcción del modelo se realizó utilizando el SIMAPRO 8.1.16 y la base de datos Ecoinvent 3.01. Para la evaluación de impacto del Ciclo de Vida se utilizó el método ReCiPe versión 1.12 para obtener los indicadores de punto medio.

Las categorías de impacto evaluadas fueron: cambio climático, reducción de la capa de ozono, toxicidad humana, formación de oxidantes fotoquímicos, acidificación terrestre, eutrofización del agua dulce, ecotoxicidad terrestre, agotamiento del agua, agotamiento de metales y agotamiento de combustibles fósiles.

Los resultados del estudio indican que la etapa que contribuye en mayor proporción a los impactos ambientales es la de transporte. En esta etapa se registra un consumo energético del 71.21% (5.403 kWh/m³) de la energía total requerida por el sistema. En el mismo sentido, es la etapa que presentó la mayor contribución porcentual a los impactos en un mayor número

de categorías (6 de 10) , contribuyendo significativamente a la reducción de la capa de ozono (70.90%), acidificación terrestre (74.04%), formación de oxidantes fotoquímicos (70.39%), agotamiento de metales (68.55%) y agotamiento de combustibles fósiles (74.14%).

La etapa de reúso presenta los valores con mayor aportación porcentual para las categorías de toxicidad humana (87.11%) y ecotoxicidad terrestre (88.13%). Esto se debe a que el 92% del agua residual de la CDMX no recibe tratamiento y es reutilizada para riego en el Valle del Mezquital

Debido a esto, se recomienda, en estudios posteriores realizar un análisis detallado sobre la eficiencia energética del equipo de bombeo, así como considerar la posibilidad de modelar el reúso de agua a gran escala para conocer su viabilidad desde la perspectiva de los impactos ambientales evitados y generados.

Palabras clave: Sistemas de agua urbanos, impacto ambiental, Análisis de Ciclo de Vida, Ciudad de México, gestión hídrica.

1. Introducción

Los procesos de urbanización han perfilado las características de los asentamientos humanos en las últimas décadas, modificando así la forma de vida de millones de personas que los habitan. Al ser un proceso generalizado, los grandes centros urbanos se han convertido en el lugar de residencia permanente de más de la mitad (54.1%) de la población mundial (DWUA 2015).

En este contexto, Latinoamérica no es la excepción, ya que también ha experimentado un proceso de urbanización progresivo y particularmente acelerado durante la segunda mitad del siglo XX. En consecuencia, actualmente la región es considerada como predominantemente urbana y junto con el Caribe es considerada la región más urbanizada del mundo en desarrollo (da Cunha y Rodríguez-Vignoli 2009 y ONU 2014). En este sentido, se estima que actualmente cerca del 80% de los habitantes de la región se asientan en zonas urbanas y que, para el año 2030 esta cifra podría incrementarse hasta llegar a 84% (Jouravlev 2004 y ONU-Hábitat 2012).

A pesar del componente urbano importante en la región, cabe mencionar que muchas de estas ciudades, a diferencia de otras regiones del mundo con un mayor grado de desarrollo económico, son el resultado de procesos de crecimiento carentes de planeación, aspecto que implica el surgimiento de una problemática peculiar (Miró 2009 y UNEP 2010). En consecuencia, las urbes Latinoamericanas tienen retos importantes para satisfacer las necesidades básicas de los nuevos pobladores, tales como una vivienda digna, un suministro de agua adecuado y servicios de saneamiento satisfactorios, entre otros (da Cunha y Rodríguez-Vignoli 2009, Miró 2009 y UNESCO 2012). En este sentido, una de las preocupaciones crecientes en los grandes conglomerados urbanos de la región es que la carencia de servicios básicos pueda promover condicionantes que detonen problemáticas relevantes desde la perspectiva de la salud pública (da Cunha y Rodríguez-Vignoli 2009, Miró 2009 y Monteiro y Alcayhuaman 2016).

Al respecto, es claro que la provisión de servicios urbanos de calidad es de gran relevancia para el bienestar de la población (da Cunha y Rodríguez-Vignoli 2009). El suministro de agua en cantidad suficiente y calidad adecuada es uno de los retos más importantes para las

grandes urbes de la región, ya que está estrechamente vinculado con la salud humana. La carencia del vital líquido o su consumo sin el cumplimiento de los parámetros de calidad adecuados, necesariamente tendrá como resultado afectaciones a la salud y el consecuente incremento de la morbilidad y mortalidad asociada con el desarrollo de enfermedades tanto transmisibles, como no transmisibles (Bogantes y Muiser 2011).

Latinoamérica cuenta con poco menos de la tercera parte de los recursos hídricos del mundo; sin embargo, los patrones de los asentamientos humanos, así como la inequidad en la dotación de servicios básicos e infraestructura, constituyen un gran reto en la provisión del agua (FCCT 2012 y Jouravlev 2004). A pesar de ello, en las últimas dos décadas se han registrado avances considerables en la materia, ya que para el año 2012 se estimaba que el 94% de los habitantes de la región de Latinoamérica y el Caribe contaba con acceso a alguna fuente de agua mejorada³. Sin embargo, cerca de 40 millones de personas seguían sin tener acceso a dichas fuentes (UNESCO 2012 y WHO-UNICEF 2014).

Con respecto a la cobertura en la provisión de servicios de saneamiento en la región, la situación es variable entre países. Cabe mencionar que la región tiene un déficit considerable en este rubro entre los grupos de menores ingresos y en los asentamientos ubicados en zonas rurales. Para 2012 se estimaba que el 82% de los habitantes de la región tenían acceso a los servicios de saneamiento; sin embargo, se estima que actualmente alrededor 120 millones carecen de dicho servicio. Además, cabe mencionar que, hasta la fecha, prevalecen carencias importantes en la calidad del servicio (Jouravlev 2004, ONU-Hábitat 2012, UNESCO 2012 y WHO-UNICEF 2014).

En el mismo ámbito, cabe mencionar que la práctica del vertido de aguas residuales sin tratamiento en cuerpos de agua o bien su uso para riego agrícola, sin el debido tratamiento, persiste. De acuerdo con Bogantes y Muiser (2011), se estimaba que en 2011 el 86% de las aguas residuales producidas en la región se vertía directamente en cuerpos de agua sin ningún tratamiento previo, cuestión que, aunada a la falta de mantenimiento y monitoreo de la infraestructura de abastecimiento, configuraban un escenario precario en el sector.

³Una fuente de agua potable mejorada, es una fuente que, por el tipo de construcción, protege adecuadamente el agua de la contaminación exterior, en particular de la materia fecal. Ejemplos de ello son las tomas de agua domiciliaria, los pozos excavados protegidos y los grifos públicos (WHO-UNICEF 2014).

Aunque en la región se ha trabajado intensamente en la construcción de infraestructura para la adecuada provisión de agua en los centros urbanos y para el saneamiento de las aguas residuales generadas, cabe mencionar que aún existen deficiencias en el tema (UNESCO 2012 y WHO-UNICEF 2014); un ejemplo de ello es el hecho de que la región conformada por América Latina y el Caribe cuenta con una cobertura del servicio de agua potable de poco más del 94%, aspecto que contrasta con una variación considerable en la cobertura que se presenta entre países y entre regiones al interior de un mismo país. En el mismo sentido, los servicios de saneamiento presentan porcentajes de cobertura que difieren considerablemente. Tal es el caso de Uruguay que reporta un 96% de su población con acceso a servicios de saneamiento mejorados, en tanto que en Haití, solamente el 24 % de la población cuenta con este tipo de servicios (Banco Mundial 2015).

La provisión de servicios urbanos, como la mayoría de las actividades humanas, provocan impactos negativos en el ambiente, llegando a contaminar, afectar e incluso mermar los recursos naturales de forma irreversible. Dichas actividades provocan impactos de diversas magnitudes en los ecosistemas naturales, así como en los ciclos que los mantienen en funcionamiento a nivel no solo local, sino global (UNESCO 2012).

El suministro de agua a las grandes ciudades, ya sea a partir de fuentes superficiales o subterráneas, no es la excepción, ya que tiene un impacto tanto en la integridad de los ecosistemas, como en los servicios que estos proveen; es por ello, que se debe prestar atención especial a la preservación de ecosistemas saludables, ya que es un requisito indispensable para contar con un suministro suficiente de agua de buena calidad (INE 2012, MEA 2005 y OMS 2005).

Los procesos y operaciones unitarias asociados con el suministro y uso del agua en las ciudades, son de especial interés, ya que el uso de energía es indispensable para acceder a los recursos hídricos a través de operaciones como el bombeo, transporte y potabilización, entre otras (FCCT 2012, UNESCO 2012 y UNESCO 2015). Dichas operaciones, además de consumir energía, sustancias químicas y materias primas diversas, generan emisiones a la atmósfera y residuos diversos, cuestión que provoca impactos ambientales de distintas magnitudes y tipos.

El consumo de energía para tener acceso al agua, es uno de los aspectos de mayor importancia en el uso del recurso, ya que, dependiendo de la fuente de la que se capte ésta, el costo energético puede diferir considerablemente. Tal es el caso del aprovechamiento de las aguas superficiales, el cual se considera menos costoso (30% aproximadamente) desde el punto de vista energético, que el de las aguas subterráneas (EPRI 2002). Sin embargo, una fuente de agua superficial distante puede ser, incluso, más costosa desde el punto de vista energético (UNESCO 2012).

Aunque pocos países se encuentran realizando investigaciones sobre los requerimientos energéticos para el suministro, uso y tratamiento del agua, éste constituye uno de los temas más relevantes en la actualidad para su manejo sustentable (UNESCO 2012). Asimismo, los impactos ambientales que genera el proceso, de manera integral, han sido poco estudiados.

Es en este contexto que el Análisis de Ciclo de Vida ambiental es de especial relevancia, en virtud de que es una metodología que permite evaluar los impactos ambientales derivados del suministro de agua potable, así como de los servicios de saneamiento. Asimismo, al ser una metodología cuyo objetivo es mejorar el desempeño ambiental de los procesos a partir del análisis de las operaciones unitarias, permite implementar cambios en etapas específicas del ciclo, con el objetivo de reducir los impactos ambientales (Heijungs y Guinée 2012).

En varios países ya se han realizado estudios que analizan los impactos de los sistemas de agua urbanos utilizando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida. Destacan los trabajos realizados por Jeong et al. (2015), en Estados Unidos; Friedrich et al. (2009), en Sudáfrica; de Haas et al. (2011) y Lane et al. (2015) en Australia y Alfonsin et al. (2014) y Sanjuan-Delmás et al. (2014) en España.

Otro de los aspectos relevantes para comprender la gestión del agua en la región, es el manejo dado a las cuencas que, en muchos casos, ha sido inadecuado, ya que sus recursos se han sobreexplotado y no se ha logrado establecer estrategias eficientes de compensación en los casos en los que se trasvasa agua de una cuenca a otra. En consecuencia, el agua, como recurso natural del cual dependen todas las actividades humanas, así como las funciones de los ecosistemas, requiere de un manejo apropiado que asegure el desarrollo sustentable y una distribución adecuada del recurso (UNESCO 2012).

Además de la problemática inherente al crecimiento urbano, el cambio climático es otro de los procesos que afectará, a mediano y largo plazos, el suministro de agua en las grandes urbes, ya que modificará la disponibilidad de agua a escala regional y alterará los patrones de fenómenos tales como sequías e inundaciones. (INE 2012, Shiao *et al.* 2014 y UNESCO 2012).

Con respecto a la administración del agua en zonas urbanas, uno de los aspectos en los que se debe redoblar esfuerzos es en el manejo integral del recurso que, idealmente, debe incluir de manera articulada, sus diferentes usos, incluido el del agua residual previamente tratada (UNESCO 2012). Actualmente, en Latinoamérica y el Caribe hay serias deficiencias en el manejo integral del agua.

Con base en lo antes expuesto, contar con información adecuada sobre los diversos aspectos que implican la gestión del agua, es sumamente relevante para los gobiernos y aquellos funcionarios responsables de la toma de decisiones (Shiao *et al.* 2014 y UNESCO 2012). Asimismo, los impactos ambientales negativos asociados con la extracción, suministro y tratamiento del agua, deben ser considerados en el proceso, a fin de poder avanzar hacia un uso sustentable del recurso.

Considerando lo anterior, en la presente tesis se busca evaluar los impactos ambientales asociados con la operación del sistema de gestión hídrica de la Ciudad de México.

2. Marco Teórico

2.1 La Ciudad de México (CDMX)

2.1.1 El Medio Físico

La cuenca del Valle de México tiene una extensión de 9,568 km² y se ubica entre tres regiones hidrológicas: Pánuco, Lerma-Santiago y Balsas. La Ciudad de México (CDMX) se localiza en la primera de ellas (INEGI 2002). Desde el punto de vista fisiográfico, la zona corresponde a una cuenca endorreica y, actualmente, el área en la que se asienta la CDMX es, en gran medida, la que ocupaba el sistema lacustre antes de ser desecado. Dicha zona está rodeada por cadenas montañosas, mesetas y cañadas (Breña-Puyol y Breña-Naranjo 2009).

Actualmente, la CDMX ocupa una superficie aproximada de 1,485.49 km², a una altitud promedio de 2,250 msnm. Se encuentra ubicada entre las coordenadas: 19° 25' 42'' N y 99° 07' 40'' O, que corresponde a la porción sur del Valle de México, rodeada por la cordillera de la Sierra Madre Oriental (volcanes Popocatepetl, Ixtlacihuatl y Ajusco) (INEGI 2016).

Con respecto a las topofomas, el área ocupada por la CDMX cuenta con sierras, lomeríos, mesetas y llanuras. Los tipos de suelo predominantes son el Andosol, seguido por el Leptosol y el Phaeozem, en tanto que el subsuelo está formado, principalmente, por materiales volcánicos y piroclásticos intercalados con depósitos aluviales cubiertos, en el centro de la cuenca, por arcillas lacustres, las cuales son suaves, plásticas y altamente compresibles (Auvinet y Juárez 2011 e INEGI 2016b).

En el subsuelo del área ocupada por la CDMX, se encuentra ubicado el acuífero denominado Zona Metropolitana de la Ciudad de México; sin embargo, tal acuífero no es su única fuente de agua (CONAGUA 2013) (Figura 2.1).

Cabe mencionar, que en dicha Zona se identifican 7 acuíferos: Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Tecocomulco, Apan, Chalco-Amecameca, Texcoco, Cuautitlán-Pachuca y Soltepec (CONAGUA 2013). Además, actualmente cuenta con algunos lagos y lagunas remanentes del antiguo sistema lacustre, entre las que destacan, por sus dimensiones, la Laguna de Zumpango (1,845 ha); el Lago de Guadalupe (430 ha); la Laguna de Tecocomulco

(1,568 ha); el Lago Dr. Nabor Carrillo (1,000 ha) y, los Lagos de Xochimilco (335ha) (CONAGUA 2013).

En la CDMX se registra una precipitación media anual de 869 mm, con un régimen estacional marcado con lluvias en el verano (CONAGUA 2015a) (Figura 2.2). El clima es cálido y templado; sin embargo, en las partes altas de las serranías puede llegar a ser frío, registrándose una temperatura media anual de 15.9°C (INEGI 2016).

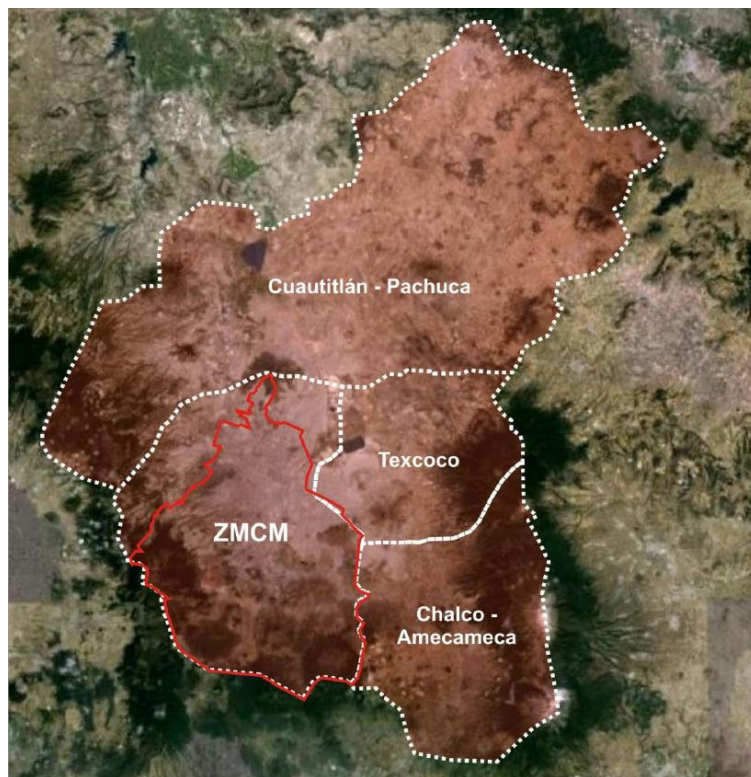


Figura 2.1.- Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

Disponible en: <http://www.zonu.com/>

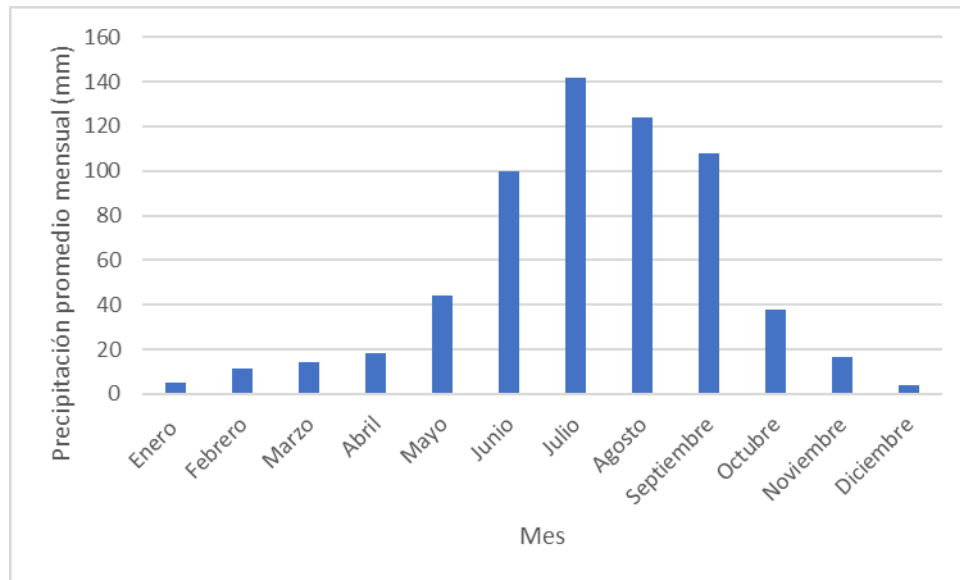


Figura 2.2.-Precipitación media mensual en la CDMX para el periodo 2010-2017

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia

Disponible en: <https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

El clima predominante es el Templado subhúmedo (87%). El resto del territorio corresponde a los climas seco y semi seco (7%) y templado húmedo (6 %) (INEGI 2016b).

Con respecto a los cuerpos de agua, la CDMX cuenta con ríos, canales, presas y lagos como se aprecia en la Tabla 2.1 y en la Figura 2.3. Sin embargo, gran parte de los ríos se encuentran entubados como resultado de las obras hidráulicas realizadas durante el siglo XX (Figura 2.4) (González Reynoso et al. 2010).

Tabla 2.1.- Cuerpos de Agua de la Ciudad de México

Ríos	Canales	Lagos	Presas
Mixcoac (entubado)	Chalco	Xochimilco	Anzaldo
Agua de Lobo	Apatlaco	San Juan de Aragón (artificial)	Mixcoac
Churubusco (entubado)	General	Chapultepec (artificiales)	
Los Remedios	Nacional		
La Piedad (entubado)	Cuemanco		
Tacubaya	Del Desagüe		
Becerra			
Consulado (entubado)			
Santo Desierto			
La Magdalena			
San Buenaventura			
El Zorrillo			
Oxaixtla			

Fuente: INEGI (2016b)

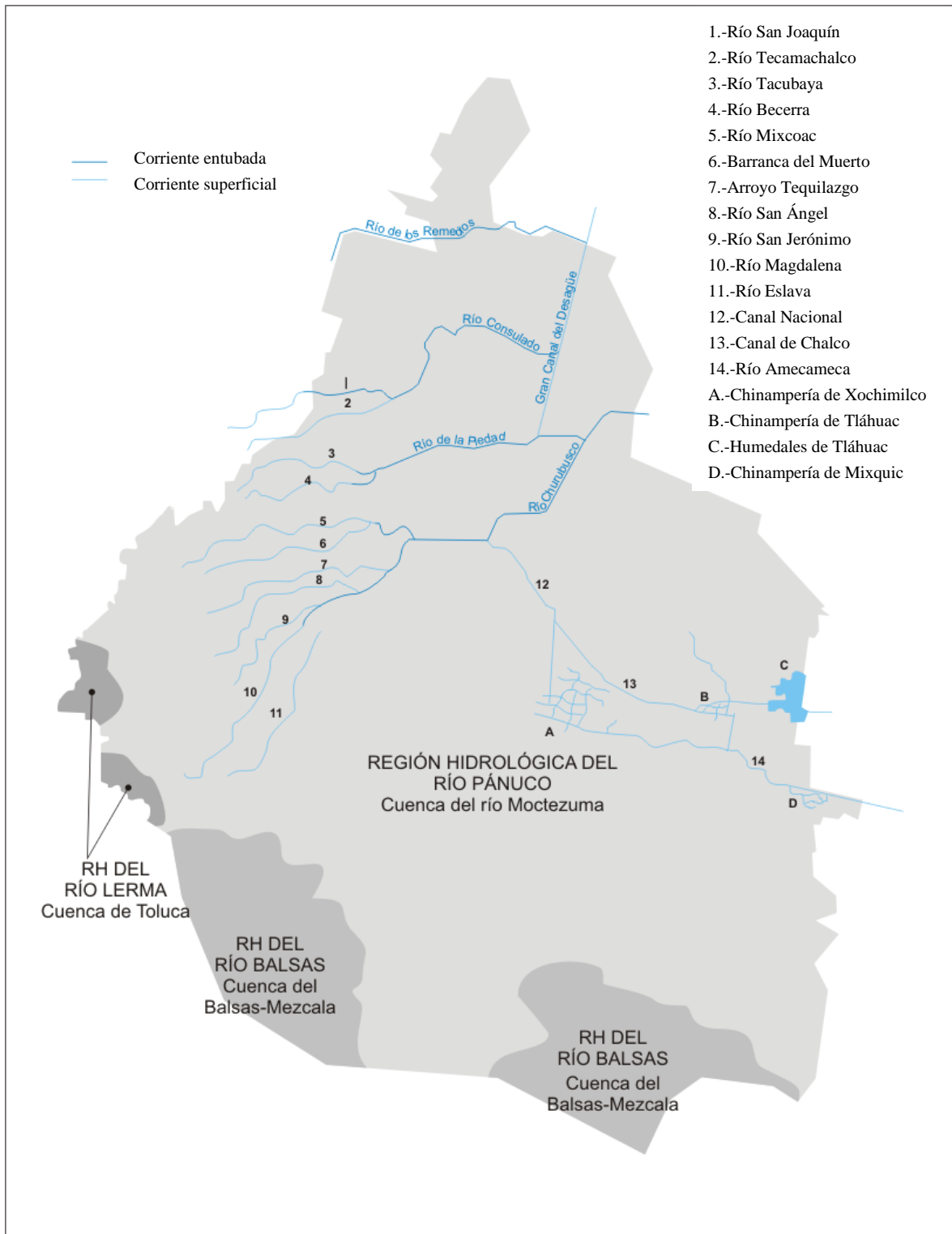


Figura 2.3.- Mapa Hidrológico de la Ciudad de México

Fuente: Dominio Público

Disponible en: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=862865>

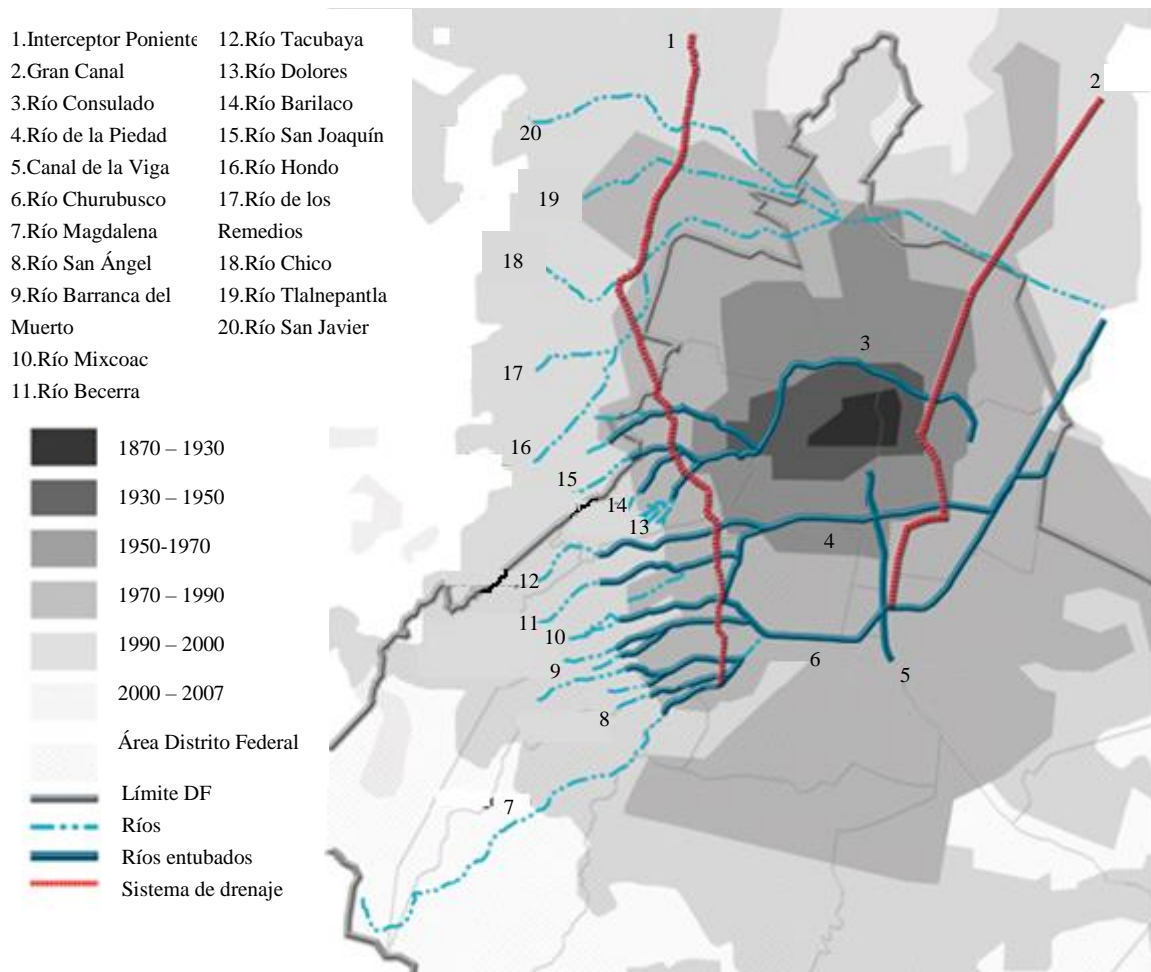


Figura 2.4.- Expansión de la Ciudad de México y Obras Hidráulicas que Implican el Entubamiento de Ríos

Fuente: Modificado de González Reynoso et al. (2010)

Aunque el área ocupada por la CDMX ha experimentado cambios significativos desde el punto de vista ambiental, actualmente se cuenta con 250.78 km² bajo algún esquema de protección, como pueden ser los parques nacionales, las zonas sujetas a conservación ecológica, los parques urbanos y las reservas ecológicas comunitarias, entre otras (GDF 2016). Se estima que, actualmente, de la superficie que no se encuentra ocupada por zonas urbanas, el 55.60% corresponde a bosques, 35.80% está destinada a actividades agrícolas, 7.17% está cubierta por pastizales y un 1.43 por matorrales (INEGI 2016b).

2.1.2 El Fenómeno Metropolitano

Aunque el estudio del fenómeno metropolitano data de hace más de medio siglo, cabe mencionar que los criterios tanto teóricos como metodológicos para su delimitación y estudio, han evolucionado considerablemente (Argulol 2005 y CEP 2009).

Para la primera mitad del siglo XX ya existían ciudades con más de 190 mil habitantes en diversos puntos de la República Mexicana; sin embargo, es en la década de 1940 cuando comienza a registrarse el proceso de expansión y formación de las principales zonas metropolitanas que conocemos actualmente (Garza Villarreal 2002, INEGI 2004 e INEGI 2012). Es en esta década cuando en los márgenes de la CDMX comienza el proceso de expansión física (también llamado crecimiento horizontal), siendo éste particularmente importante por sus dimensiones (INEGI 2004).

Para mediados de la década de 1950, se registra el crecimiento de los municipios ubicados al norte del Distrito Federal; diez años después, en 1960, municipios como Naucalpan y Tlalnepantla, pertenecientes al Estado de México, ya se han integrado plenamente a la CDMX (CEP 2009 y Florescano *et al.* 1983).

En las siguientes dos décadas, el crecimiento de la Ciudad es constante y se incrementa sustancialmente debido al flujo migratorio de habitantes de localidades rurales quienes, en busca de mejores condiciones de vida, en un principio se asientan en zonas con una topografía accidentada y en zonas que, generalmente, carecían de servicios básicos. Este proceso se ve acentuado por la concentración de las actividades económicas en los centros urbanos (Florescano *et al.* 1983).

Es en este periodo en el que también comienza el surgimiento y desarrollo de asentamientos irregulares al interior de la Ciudad, en zonas no destinadas para este fin y que, incluso, no eran aptas para la edificación de viviendas (CEP 2009, FMVM 2011 e Iracheta-Cenecorta 2003).

Durante la década de 1980, el crecimiento horizontal de la ciudad fue relevante debido a la expansión de las vías de comunicación y de las rutas de transporte público, así como al notable desarrollo de la infraestructura del sistema de transporte colectivo existente,

facilitando así, la integración acelerada de los municipios del Estado de México (Breña-Puyol y Breña-Naranjo 2009, CEP 2009 e Iracheta-Cenecorta 2003).

Como resultado de este proceso, de acuerdo con Iracheta-Cenecorta (2003), a inicios de la década de 1990 se presenta ya una *conurbación funcional y física*, sustentada por el incremento en la infraestructura y servicios de transporte y el desarrollo industrial de la zona conurbada (CEP 2009).

Cabe destacar, que un componente importante del proceso de urbanización antes mencionado, se configuró sin apego a los planes de desarrollo urbano u ordenamiento correspondientes, e incluso, generando asentamientos en zonas de alto riesgo como barrancas, minas de arena y laderas inestables, además de zonas catalogadas como suelo de conservación (CEZM 2006 e Iracheta-Cenecorta 2003).

Actualmente la CDMX está conformada por 16 alcaldías, con una población estimada, para el año de 2015, de 8,851,080 habitantes (INEGI 2016a).

Cabe mencionar que el proceso de conurbación existente entre la CDMX y municipios de los Estados de México e Hidalgo, ha configurado lo que se denomina Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) que, además de la CDMX, incluye 59 municipios del Estado de México y 1 municipio del Estado de Hidalgo (Tabla 2.2) (INEGI 2012). Para 2012, se estimaba que la ZMVM se extendía en una superficie de aproximadamente 7,866.1 km², con una densidad media urbana de 160.1 habitantes/ha (INEGI 2012). Actualmente es considerada la megalópolis más grande de Latinoamérica y una de las más grandes del mundo, con una población que rebasa los 20 millones de habitantes, de los cuales más de la mitad habitan en municipios del Estado de México (INEGI 2012 y World Population Review 2017). Se espera que, tan solo la CDMX, alcanzará los 8,738,914 habitantes para el año 2020 (CONAPO 2017).

Tabla 2.2.- Municipios y Delegaciones que Integran la ZMVM

Delegaciones (CDMX)			
Azcapotzalco	Apaxco	Juchitepec	Tlalmanalco
Coyoacán	Atenco	Melchor Ocampo	Tlalnepantla de Baz
Cuajimalpa de Morelos	Atizapán de Zaragoza	Naucalpan de Juárez	Tultepec
Gustavo A. Madero	Atlautla	Nezahualcóyotl	Tultitlán
Iztacalco	Axapusco	Nextlalpan	Villa del Carbón
Iztapalapa	Ayapango	Nicolás Romero	Zumpango
La Magdalena Contreras	Coacalco de Berriozábal	Nopaltepec	Cuatitlán Izcalli
Milpa Alta	Cocotitlán	Otumba	Valle de Chalco Solidaridad
Álvaro Obregón	Coyotepec	Ozumba	Tonanitla
Tláhuac	Cuautitlán	Papalotla	
Tlalpan	Chalco	La Paz	
Xochimilco	Chiautla	San Martín de las Pirámides	
Benito Juárez	Chicoloapan	Tecámac	
Cuauhtémoc	Chiconcuac	Temamatla	
Miguel Hidalgo	Chimalhuacán	Temascalapa	
Venustiano Carranza	Ecatepec de Morelos	Tenango del Aire	
	Ecatzingo	Teoloyucan	
	Huehuetoca	Teotihuacán	
Municipio (Edo. De Hgo.)	Hueypoxtla	Tepetlaoxtoc	
Tizayuca	Huixquilucan	Tepetlixpa	
	Isidro Fabela	Tepetzotlán	
Municipios (Edo. De Mex.)	Ixtapaluca	Tequixquiac	
Acolman	Jaltenco	Texcoco	
Amecameca	Jilotzingo	Tezoyuca	

2.2 Gestión del Agua en la Ciudad de México: Situación Actual

De conformidad con el artículo 9 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA 2015), la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en su carácter de órgano desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), es el “Órgano Superior con carácter técnico, normativo y consultivo de la Federación, en materia de gestión integrada de los recursos hídricos, incluyendo la administración, regulación, control y protección del dominio público hídrico”.

Sin embargo, cabe mencionar que, el artículo 115 (fracción III, Inciso a) de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, establece que los municipios tendrán a su cargo los servicios públicos de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales. En el mismo sentido, el artículo 45 de la Ley de Aguas Nacionales (LAN 2014), señala que:

“Es competencia de las autoridades municipales, con el concurso de los gobiernos de los estados en los términos de esta Ley, la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales que se les hubieran asignado, incluyendo las residuales, desde el punto de su extracción o de su entrega por parte de "la Autoridad del Agua", hasta el sitio de su descarga a cuerpos receptores que sean bienes nacionales. La explotación, uso o aprovechamiento se podrá efectuar por dichas autoridades a través de sus entidades paraestatales o de concesionarios en los términos de Ley”.

Con base en lo anterior, se establece que el suministro de agua puede llevarse a cabo mediante entidades para-estatales o concesionarios, como es el caso del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM), el cual provee el servicio, en las 16 delegaciones políticas de la CDMX. Así, la CONAGUA entrega el agua proveniente de las fuentes de captación operadas de acuerdo con sus atribuciones, en diversos puntos, al SACM, quien se encarga de su distribución en la CDMX. Tal es el caso del agua proveniente de fuentes externas a la CDMX como es el sistema Cutzamala y las baterías de pozos que se ubican en el estado de México. Además, el SACM opera sus propias fuentes de captación (pozos, manantiales y 1 río), de acuerdo con sus atribuciones.

La Ley de Aguas del Distrito Federal, establece que el SACM es un Órgano Desconcentrado adscrito a la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, cuyo objetivo principal es operar la infraestructura hidráulica, prestando así el servicio público de agua potable y alcantarillado, así como el tratamiento y reúso de aguas residuales. Asimismo, entre sus facultades se encuentran el desarrollo de estudios, proyectos y obras en materia hidráulica para la CDMX (LADF 2008 y SACM 2015). En la Figura 2.5 se presenta el organigrama resumido del SACM.

De conformidad con la regionalización propuesta por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la CDMX se encuentra dentro de la Región Hidrológico-Administrativa⁴ (RHA) XIII. Dicha región, denominada Aguas del Valle de México, comprende, además de las 16 delegaciones de la CDMX, 105 municipios de los estados de México, Hidalgo y Tlaxcala, con una población de aproximadamente 23 millones de habitantes, los cuales, además de requerir del suministro de agua para sus actividades, demandan servicios de saneamiento (CONAGUA 2012 y CONAGUA 2014a)(Figura 2.6).

Además de la CONAGUA y el SACM, El Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM), también participa en la gestión del agua en la región, ya que es responsable de la administración del recurso agua y de la operación de los programas federales. Sin embargo, a diferencia de otros organismos de cuenca que operan en el país, el OCAVM tiene a su cargo la operación de infraestructura en estrecha colaboración con la CONAGUA, en particular en lo referente a la operación del Sistema Cutzamala (BID 2012 y UNESCO 2017).

⁴ RHA: Área territorial definida de acuerdo con criterios hidrológicos, integrada por una o varias regiones hidrológicas, en la cual se considera a la cuenca hidrológica como la unidad básica para la gestión de los recursos hídricos (CONAGUA 2014a).

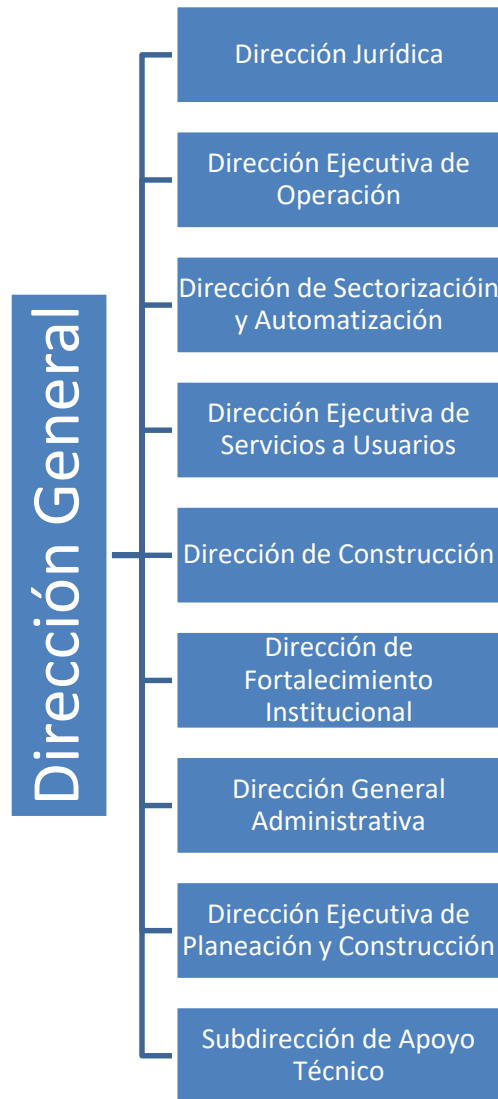


Figura 2.5.-Organigrama Resumido del Sistema de Aguas de la Ciudad de México



Figura 2.6 .- Regiones Hidrológico Administrativas de México

Fuente: PAOT (2000)

Disponible en: www.paot.org.mx

2.3 El Agua en la Ciudad de México

2.3.1 Captación y Transporte

Se estima que el suministro de agua a la ZMVM es de $88.7 \text{ m}^3/\text{s}$, de los cuales una proporción considerable proviene de la explotación de acuíferos locales y, en menor proporción, de fuentes alternas. El Sistema Cutzamala aporta el 17%, el Sistema Lerma el 5%, la extracción de agua subterránea constituye el 68%, ríos y manantiales el 3% y el reúso el 7% (Banco Mundial 2013).

En el caso de la CDMX, el suministro es de $31.5 \text{ m}^3/\text{s}$, de los cuales, 27.36% corresponde al sistema Cutzamala, 13.14% al sistema Lerma, 6.3% a ríos y manantiales locales, 48.2% a agua subterránea y 5% a reúso (CONAGUA 2013 y CONAGUA 2014b) (Figura 2.7).

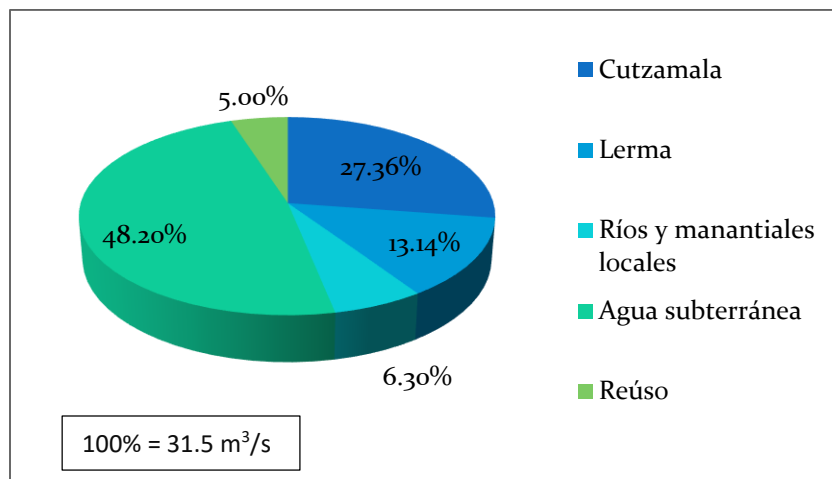


Figura 2.7.- Fuentes de Abastecimiento de Agua para la Ciudad de México

El caudal proveniente del Sistema Cutzamala (agua superficial) se transporta, mediante 6 plantas de bombeo, a través de un recorrido de unos 120 km de distancia hasta la CDMX, con un gradiente altitudinal, en contra, de aproximadamente 1,100 m (Figura 2.8). Este sistema provee agua a 11 delegaciones de la CDMX y 11 municipios del Estado de México (CONAGUA 2015a). Aprovecha el agua de la cuenca alta del río del mismo nombre y está constituido por las presas Tuxpan y el Bosque en el estado de Michoacán, Colorines, Ixtapan del Oro, Valle de Bravo, Villa Victoria y Chilesdo en el Estado de México (CONAGUA 2005)(Figura 2.8).

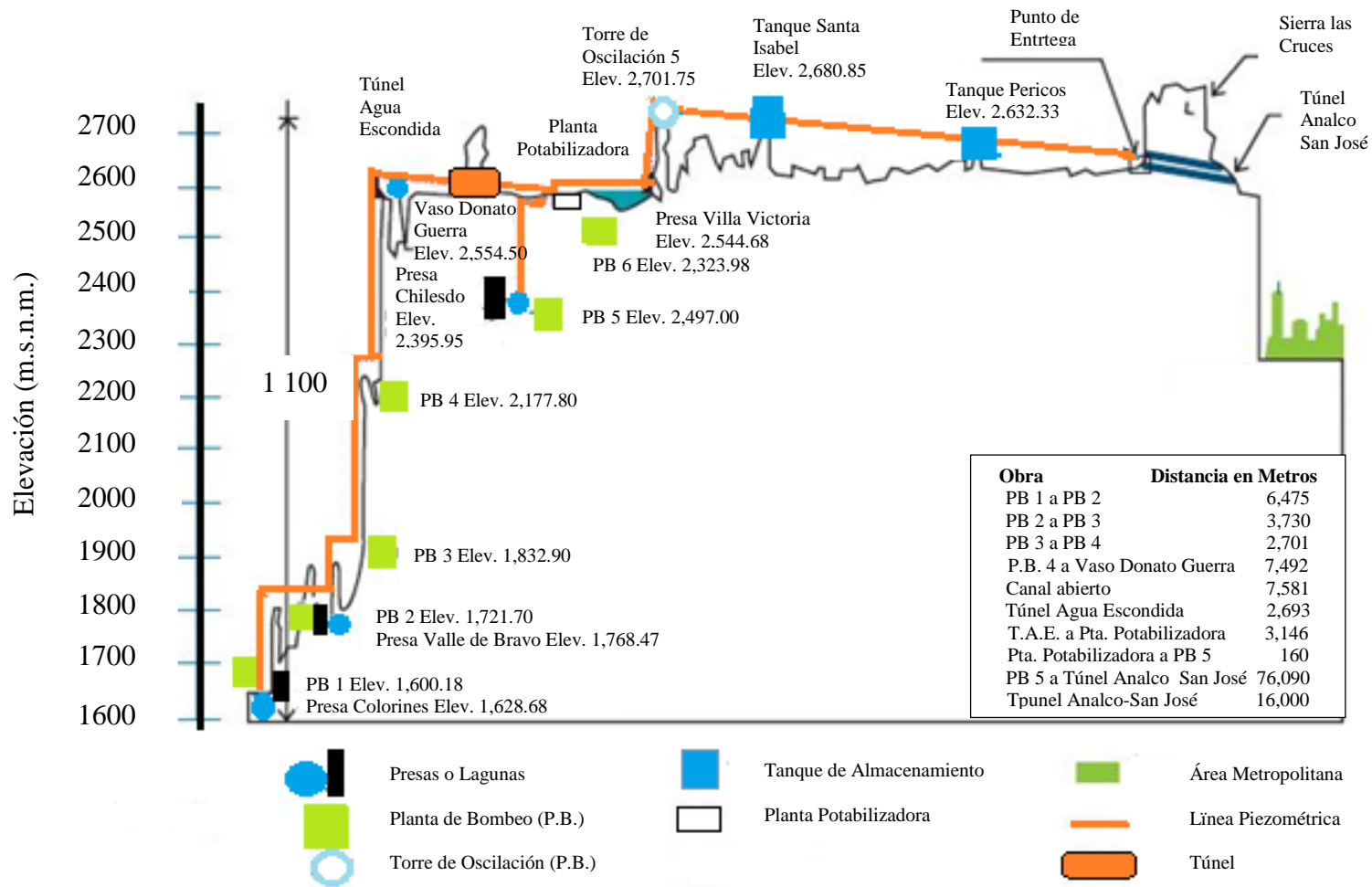


Figura 2.8.- Perfil del Sistema Cutzamala

Fuente: CONAGUA (2014)

Por su parte, el Sistema Lerma, conformado por alrededor de 350 pozos, 250 de los cuales son operados por el SACM, provee de agua a la CDMX mediante el túnel Atarasquillo-Dos Ríos que atraviesa la Sierra de las tres Cruces y, al igual que el agua proveniente del Sistema Cutzamala, recorre una distancia considerable hasta ser distribuida en la CDMX (CONAGUA 2013, Escolero et al. 2016, Torres Bernardino 2014 y Transparencia DF 2008). Cabe mencionar que el agua proveniente del Sistema Lerma es transportada por gravedad a la Ciudad de México mediante un acueducto, al cual, mediante bombeos cortos (menos de 10 m) se conduce el agua proveniente de los manantiales de la zona de Almoloya del Río, los de Texcaltenco, Alta Empresa y Ameyalco (Torres Bernardino 2014 y Viejo Zubicaray 2000).

Dicho acueducto tiene una longitud de 60.117 km, con una pendiente general, a cielo abierto, de 0.12 m/km, presentando en el túnel una pendiente de 0.60 m/km. De estos 60.117km, 24.341km corresponden al acueducto superior en el valle de Toluca, 14.133 km al túnel de Atarasquillo-Dos Ríos y 21.443 km al acueducto inferior en el Valle de México (Torres Bernardino 2014). En este contexto, el acueducto del Sistema Lerma aprovecha el hecho de que el Valle de Toluca se encuentra a una altitud de 247 m por encima de la de la Ciudad de México (Torres Bernardino 2014 y Viejo Zubicaray 2000).

Cabe mencionar que, aunque la Presa Madin forma parte del Sistema Lerma y aporta el 5% del caudal total de este sistema, no provee agua a la CDMX, ya que solamente lo hace a algunas localidades del Estado de México (BID 2012).

El abastecimiento correspondiente a las aguas subterráneas se realiza a partir de siete acuíferos de la zona (Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Tecocomulco, Apan, Chalco-Amecameca, Texcoco, Cuautitlán-Pachuca y Soltepec), de los cuales se bombea el líquido desde diferentes profundidades (Banco Mundial 2013).

Una parte del agua subterránea suministrada a la CDMX corresponde al sistema conocido Sistema de Pozos Plan de Acción Inmediata (PAI), el cual está integrado por siete baterías de pozos ubicados en las tres entidades que integran la ZMVM. En conjunto, suman un total de 217 pozos (solamente 156 se encuentran en operación) que abastecen a 5 delegaciones de la CDMX (Acapotzalco, Gustavo A. Madero, Iztapalapa, Venustiano Carranza y Tláhuac),

al municipio de Tizayuca en el Estado de Hidalgo y a 9 municipios del Estado de México pertenecientes a la ZMVM (CONAGUA 2013) (Tabla 2.3 y Figura 2.9).

Tabla 2.3.- Ramales del Sistema de Pozos Plan de Acción Inmediata (PAI)

Ramal	Número de Pozos
Tizayuca-Pachuca	33
Teoloyucan	48
Los Reyes-Ferrocarril	49
Reyes-Ecatepec	35
Tláhuac-Nezahualcóyotl	20
Mixquic-Santa Catarina	18
Texcoco-Peñón	14
Total	217

Fuente: Modificado de CONAGUA (2016a).

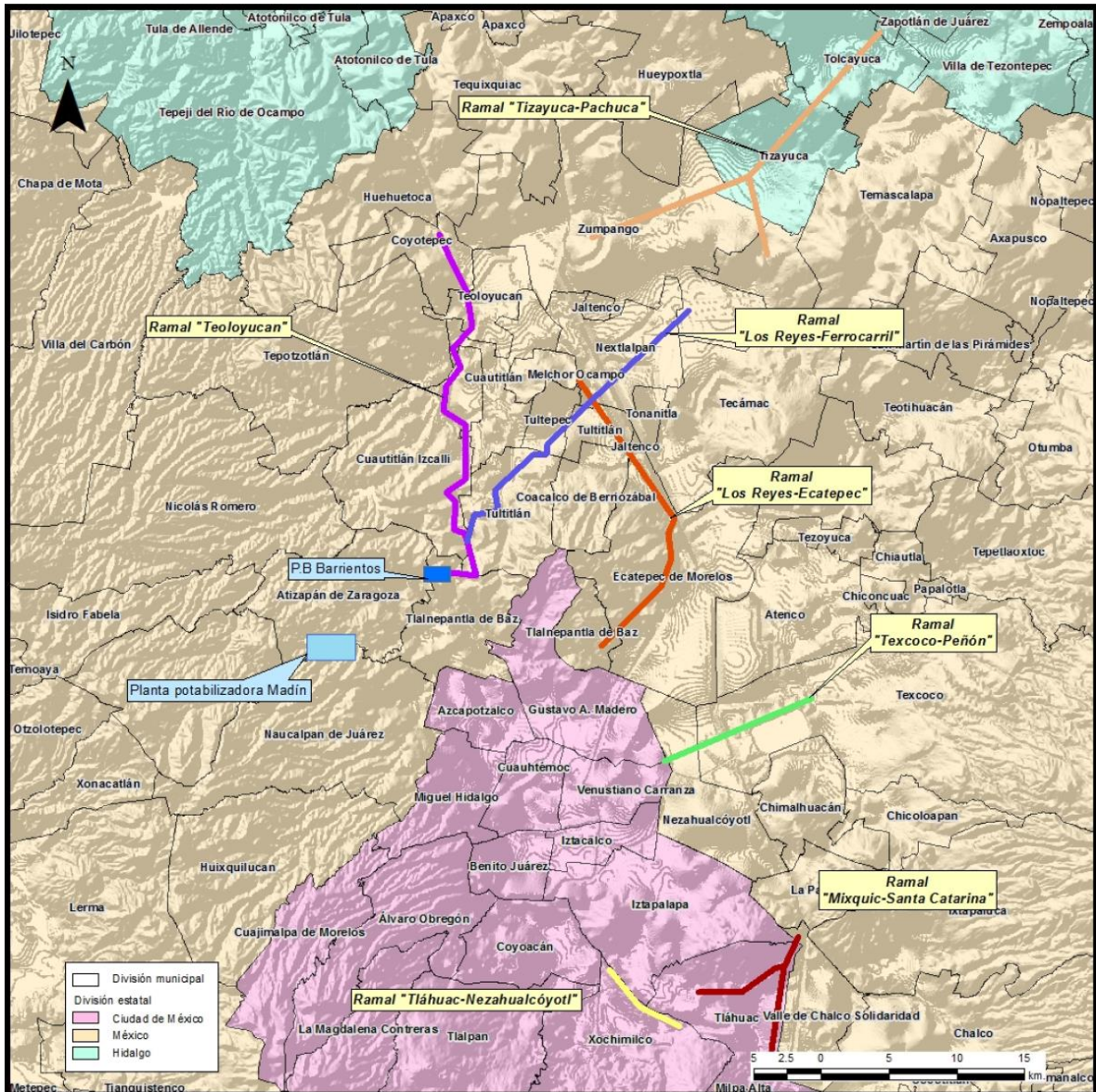


Figura 2.9.- Ubicación de los Ramales del Sistema de Pozos Plan de Acción Inmediata (PAI)

Fuente: Escolero et al. (2016)

También, entre las fuentes que proveen agua subterránea se encuentra el sistema Chiconautla, en el estado de Hidalgo, el cual abastece de agua a la CDMX mediante la operación de 41 pozos localizados a una distancia de aproximadamente 32 kilómetros con respecto al centro de la ciudad (Escolero et al. 2010).

Además, otra parte del agua proveniente de fuentes subterráneas se obtiene mediante la operación de los 549 pozos, con una profundidad promedio de 216 m, operados por el SACM y ubicados dentro del territorio de la CDMX (Escolero et al. 2016).

Con respecto a los manantiales y ríos, se aprovechan 18 manantiales y un río, el Río Magdalena. Su manejo corresponde al SACM y se encuentran ubicados en el territorio de la CDMX, en su mayoría, en la zona sur de la ciudad (Escolero et al. 2016).

No obstante que el porcentaje de agua proveniente de ríos y manantiales dentro de la CDMX es menor al de las fuentes de abastecimiento antes citadas, éste resulta de importancia local; un ejemplo de ello, es el caso del Río Magdalena que, con un gasto de 210 l/s beneficia a más de 150,000 habitantes (CONAGUA-SEMARNAT 2014). Al respecto, cabe mencionar que en este caso la captación y el transporte no requieren de bombeo, debido a la ubicación de la fuente y de la planta potabilizadora.

Con base en lo antes expuesto, es claro que el suministro de agua a la CDMX depende, en una gran proporción del acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México, además de que implica una diversidad considerable de fuentes para poder satisfacer la demanda creciente del recurso en la CDMX (Escolero et al. 2016) (Tabla 2.4).

Tabla 2.4.- Fuentes de Abastecimiento de Agua a la Ciudad de México

Fuente	Infraestructura	Organismo Operador	Área de Captación	Gasto (m³/s)
Pozos en la CDMX	549 pozos	SACM	Ciudad de México	14
Sistema Chiconautla	41 pozos	SACM	Cuautitlán-Pachuca	1.46
Sistema Plan de Acción Inmediata (PAI)	156 pozos	OCAVM	Cuautitlán-Pachuca y Texcoco	2.83
Sistema Lerma	250 pozos	SACM	Toluca e Ixtlahuaca-Atlacomulco	4.4
Sistema Cutzamala	7 presas	OCAVM	Cuenca del Río Cutzamala	6.7-9.69.6
Manantiales	18 manantiales	SACM	Zona Sur de la CDMX	0.8
Total				30.19 - 33.09

Fuente: Escolero et al. (2016)

2.3.2 Potabilización y Distribución

La CDMX cuenta con 43 plantas potabilizadoras municipales en operación, con una capacidad total instalada de 4,790.5 l/s (CONAGUA 2015a). Además, es importante hacer hincapié en que en el Estado de México se encuentra la planta potabilizadora Los Berros en el municipio de Villa de Allende, con una capacidad instalada de 20,000 l/s, que también presta servicios a la CDMX. El proceso más utilizado para la potabilización es el de filtración directa, seguido por el de ósmosis inversa. Cabe mencionar que la planta potabilizadora Los Berros opera con procesos de clarificación convencional (CONAGUA-SEMARNAT 2014).

De acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994, el proceso de ósmosis inversa *es un proceso esencialmente físico que se utiliza para la remoción de iones y moléculas disueltos en el agua que, por medio de altas presiones fuerza el paso del agua a través de una membrana*

semipermeable de porosidad específica, retirando así los iones y moléculas de mayor tamaño. Cabe mencionar que este proceso requiere que el agua a potabilizar se encuentre libre de cloro, además de que, dependiendo de la calidad del agua, el permeado representa solamente entre el 35-70% del agua que ingresó al proceso, de manera que el agua restante se descarta.

Por otra parte, es importante considerar que es necesario operar el proceso bajo condiciones específicas, que incluyen un pretratamiento y un postratamiento, de acuerdo con lo siguiente:

Pretratamiento: Esta etapa incluye un pretratamiento físico que consiste en la remoción de sólidos por filtración mecánica y/o un tratamiento químico con inhibidores de incrustaciones, coagulantes y desinfectantes (WHO 2011).

Postratamiento: Esta etapa incluye dos operaciones principales: desinfección y acondicionamiento del agua tratada. En el primer caso se puede usar la cloración del agua, la aplicación de luz UV o bien la aplicación de ozono. En el segundo caso, de ser necesario, se debe de ajustar el pH y balancear las sales contenidas en el agua (WHO 2011).

En el caso de la filtración directa se incluyen los procesos de coagulación-decantación y filtración rápida, y se puede incluir el proceso de floculación. Finalmente se realiza la desinfección, generalmente utilizando hipoclorito de sodio o cloro en estado gaseoso. Cabe mencionar que durante este proceso los reactivos más utilizados para la coagulación y floculación son el sulfato de aluminio y la cal, sin embargo, también se pueden utilizar polímeros comerciales. Con respecto a la filtración, los medios filtrantes utilizados más comúnmente son los de arena-antracita.

El proceso de clarificación convencional que se lleva a cabo en la potabilizadora Los Berros consiste, principalmente, en una precloración, la adición de sulfato de aluminio para promover la floculación y permitir la precipitación por gravedad de los sólidos en el agua, una filtración de arenas rápidas y, finalmente, un proceso de desinfección con cloro gaseoso (Campos-López 2015 y Trejo-Morales et al. 2004).

Cabe mencionar que el proceso de potabilización, se da en momentos diferentes dependiendo de la fuente de suministro, como se explica a continuación.

En el caso del sistema Cutzamala, la potabilización se lleva a cabo en la planta potabilizadora Los Berros, de manera que el agua se potabiliza antes de ser transportada al punto de entrega, que se encuentra en partes altas de las delegaciones Cuajimalpa y Álvaro obregón, donde es almacenada en tanques desde los que se hace la distribución (SACM 2016).

En el caso de los pozos localizados en la CDMX, los pertenecientes al sistema Chiconautla, los del Sistema Plan de Acción Inmediata (PAI) y el Sistema Lerma, al igual que los manantiales es variable, ya que algunas plantas potabilizadoras que se encuentran a pie de pozo, en tanto que otras reciben un caudal para potabilizar (SACM 2016).

Una vez potabilizada, el agua se distribuye, ya sea desde los 356 tanques de almacenamiento operados por el SACM o bien, desde las plantas potabilizadoras hacia la red primaria o secundaria de tuberías. En el primer caso, el agua se conduce a través de una red primaria de tuberías de aproximadamente 2,000 km, a lo cual habría que agregar su distribución al interior de la CDMX, a través de 12,000 km de tuberías menores al interior de cada Delegación. Sin embargo, en diversas Delegaciones, el suministro de agua en pipas es aún una práctica común, ya que a pesar de contar con la infraestructura en la mayoría del territorio, el servicio es, en algunos casos, intermitente (CONAGUA 2012 e IMCO 2010).

Cabe mencionar que, para la distribución del agua potable al interior de la ciudad se cuenta con 190 plantas de bombeo, además de 76 plantas del mismo tipo ubicadas en localidades del Estado de México e Hidalgo (SACM 2016).

Con respecto a la distribución, aunque la cobertura rebasa el 97% en la CDMX, la calidad del servicio no es óptima, ya que éste es, en no pocas ocasiones, intermitente, con calidad variable, además de que, frecuentemente, la presión con la que se suministra el líquido no es la adecuada (Banco Mundial 2013 y CONAGUA 2015a). Debido a esto, es práctica general que los inmuebles en la CDMX cuenten con tinacos, aljibes, cisternas o depósitos que permiten almacenar agua ante una eventual suspensión del servicio. De acuerdo en el INEGI (2015), en un estudio realizado en 2013, más de la mitad de los hogares en la CDMX contaban con un tinaco y, poco más del 20% contaban con una bomba para el llenado del mismo, en vista de que la presión con la que se suministra el líquido no es suficiente.

Con el objetivo de lograr una distribución más eficiente del agua en la CDMX y en los municipios de la zona conurbada, en 1983 inició la construcción del proyecto de un circuito que rodearía a la CDMX. En la parte norte, el denominado Macrocircuito se localiza en los municipios de Naucalpan, Cuautitlán, Ecatepec y La Paz, y cuenta con una tubería de acero de 110 km de longitud, en tanto que en la parte sur se denomina Acuaférico y se localiza en las delegaciones Cuajimalpa, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras y Tlalpan de la CDMX, y cuenta con una tubería de concreto de 32 km de longitud. La construcción y operación del Macrocircuito y el Acuaférico tiene avances considerables, pero su construcción se detuvo en el año 2001, sin haber sido reanudada hasta la fecha (Figura 2.10). El proyecto original era de gran importancia principalmente para los habitantes de la zona oriente de la CDMX, en la cual el suministro de agua es deficiente y las fuentes de suministro utilizadas actualmente son insuficientes para cubrir la demanda (SACM 2012).

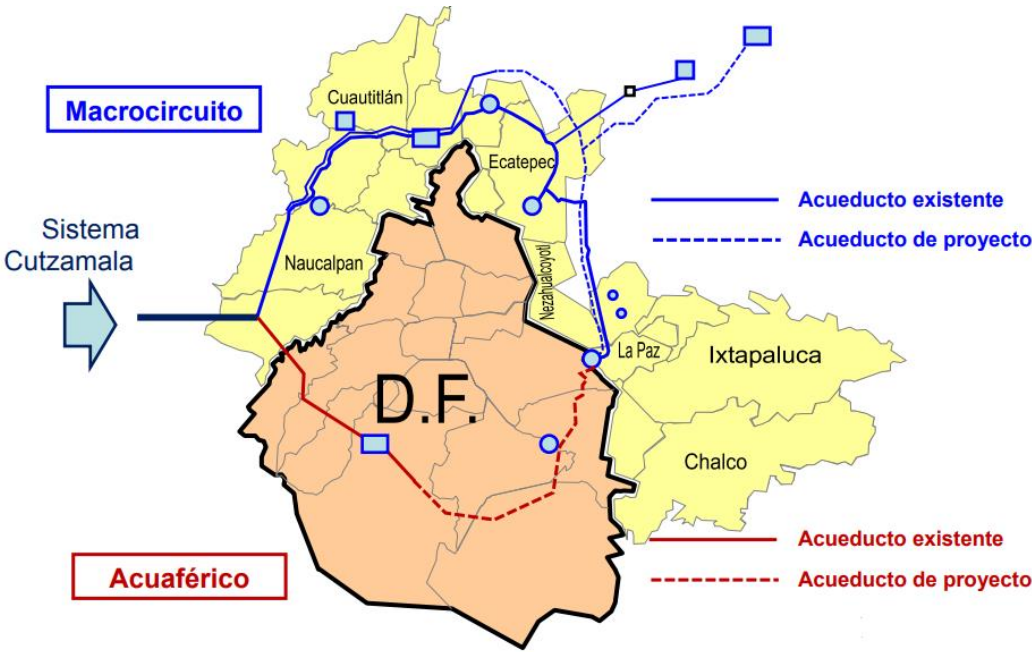


Figura 2.10.- Ubicación del Macrocircuito y de Acuaférico

Fuente: Modificado de Fernández-Esparza (2010)

Por otra parte, es importante considerar que el sistema de suministro de agua a la CDMX, como cualquier sistema de este tipo, registra pérdidas físicas, las cuales se ha estimado, se

encuentran entre el 35 y 40% (Arreguín et al. 1997, Breña Puyol y Breña Naranjo 2009, de la Peña et al. 2013 y SACM 2012).

2.3.3 Uso

Con respecto al uso del agua en la CDMX, el predominante es el público urbano, seguido por el industrial, como se observa en la Figura 2.11. En este ámbito se encuentran tres tipos de usos principales: el uso doméstico, el uso no doméstico y el uso mixto. En el primer caso, se trata del uso que corresponde a tomas de tipo habitacional, en el segundo caso, se trata de tomas que corresponden a uso no habitacional y, en el tercer caso, corresponde a inmuebles que están destinados de manera conjunta a uso habitacional y no habitacional (SACM 2015). En lo que respecta al uso doméstico, principalmente corresponde a lavado de ropa, aseo de pisos, operación de sanitarios y aseo personal. En el caso del uso no doméstico, se encuentran actividades diversas, principalmente de tipo comercial. Con respecto al uso mixto, como ya se mencionó, se integran tanto usos correspondientes al ámbito habitacional como al no habitacional a partir de una misma toma (SACM 2015).

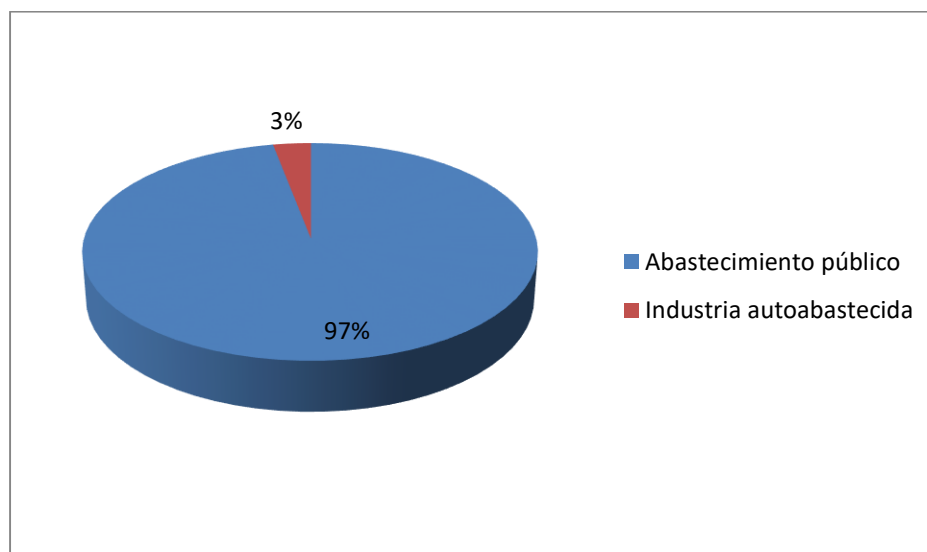


Figura 2.11.- Usos del Agua en la Ciudad de México

Fuente: CONAGUA (2015a)

2.3.4 Recolección y Tratamiento

En la CDMX, al igual que en la mayor parte del país y de la Región, el sistema de alcantarillado es combinado; es decir, no hay un manejo diferenciado entre las aguas residuales municipales y el agua de lluvia. Con respecto a la cobertura, se tiene que en la CDMX el 99,07% de los habitantes tiene acceso al servicio (CONAGUA 2015a).

El sistema de drenaje de la CDMX cuenta con diversos elementos para desalojar las aguas residuales fuera de la cuenca, como se explica a continuación:

1.- Tajo de Nochistongo: Es una salida artificial que fue construida a principios del siglo XVII en los cerros de Huehuetoca, en el Estado de México, aprovechando un sistema de arroyos, ríos y canales que se encuentra ubicado entre los estados de México e Hidalgo. La longitud total de la obra es de más de 12 km. Esta salida empezó a operar con el objetivo de evitar la inundación de la cuenca. Cabe mencionar que las aguas desalojadas en este punto se incorporan a la cuenca del Pánuco y llegan hasta el Golfo de México (González Reynoso et al. 2010)(Figura 2.12).



Figura 2.12.- Tajo de Nochistongo (Ca. 1920)

Fuente: SACM (2012).

2.-Gran Canal de Desagüe: Es un canal que tiene una longitud de 47 km iniciando en San Lázaro en la CDMX, hasta los túneles para el desalojo de aguas en Tequisquiatic, Estado de México. La operación de esta obra comenzó a principios del siglo XX, aunque paulatinamente, y debido a la extracción de agua del subsuelo perdió la pendiente que le permitía operar por gravedad, de manera que actualmente hay una planta de bombeo que ayuda a vencer la contrapendiente y desalojar el agua de la cuenca (González Reynoso et al. 2010 y SACM 2012) (Figuras 2.13 y 2.14).

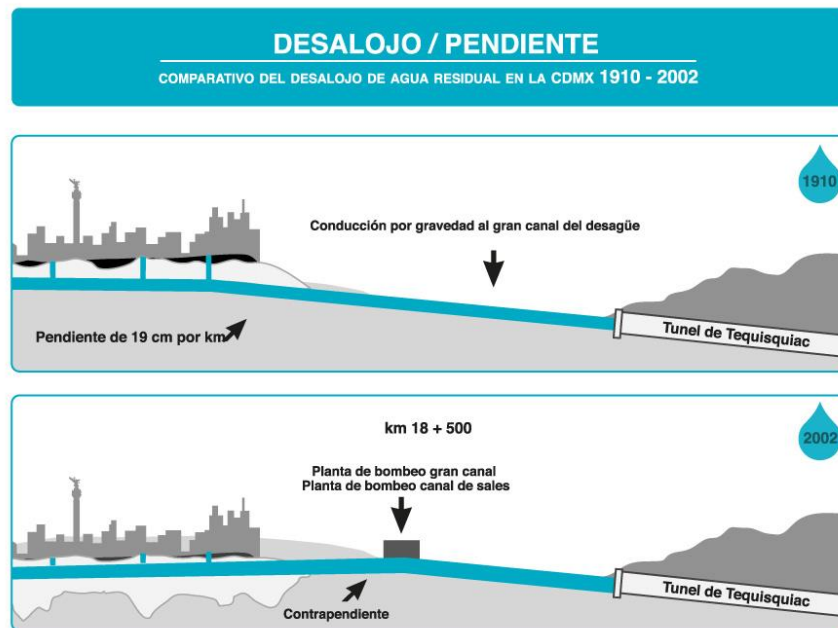


Figura 2.13.- Gran Canal de Desagüe

Fuente: Gobierno de la Ciudad de México (2016).
Disponible en: http://www.cuidarelagua.cdmx.gob.mx/a_donde_va.html



Figura 2.14.- Vista Aérea del Gran Canal de Desagüe

Fuente: SACM (2012).

3.-Sistema de Drenaje Profundo: Se construye como solución a la pérdida de la pendiente del Gran Canal de Desagüe, y con el objetivo de contar con infraestructura que no fuera afectada por los hundimientos del terreno. Este sistema empezó a operar en 1975 y está compuesto por un emisor central y 7 interceptores con una longitud de más de 150 km, los cuales reciben, por bombeo y gravedad, las aguas residuales de la CDMX. Cabe mencionar que el drenaje profundo funciona por gravedad (González Reynoso et al. 2010 y SACM 2012)(Tabla 2.5 y Figuras 2.15 y 2.16) .

Originalmente, la función principal del sistema era conducir, fuera del valle, el agua de lluvia, aunque, actualmente, también conduce las aguas residuales, desde la Delegación Gustavo A. Madero en la CDMX, hasta la salida del Túnel Central de Descarga (Emisor Central). En este punto, el 60% del caudal ingresa a tratamiento en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Atotonilco y el 40% restante continúa su curso aguas abajo hasta desembocar en el Golfo de México (SACM 2012 y Bello 2016). Las aguas tratadas siguen dos rutas: el canal el Salto-Tlamaco que provee de agua las áreas de irrigación del Valle

Mezquital y el río El Salto, del cual derivan algunos canales de irrigación que, a su vez, vierte su exceso en las presas Requena y Endho (Bello 2016).

En este contexto, el drenaje profundo de la CDMX es una de las obras hidráulicas de mayor relevancia, ya que permite el manejo de aproximadamente 150 m³/s de aguas residuales y de lluvia, que son desalojados de la cuenca y que, de otra manera, constituirían un grave problema para la urbe (CONAGUA 2013).

Tabla 2.5.- Caracterización del Sistema de Drenaje Profundo

Componente	Longitud	Diámetro (m)	Capacidad (m³/s)	Profundidad (Min-Max)
Emisor Central	50	6.5	220	48-217
Interceptor Central	16.1	5.0	90	22-41
Interceptor Centro-Centro	3.7	5.0	90	25-26
Interceptor Oriente	22.2	5.0	85	37-55
Interceptor Centro Oriente	16	4.0	40	20-40
Interceptor Poniente	16.5	4.0	25	20-40
Interceptor Iztapalapa	5.5	3.1	20	11-16
Interceptor Obrero Mundial	0.8	3.2	20	10-16
Interceptor Oriente Sur	13.8	5.0	85	20-23
Canal Nacional Chalco Chalco	8.7	3.1	20	15-17

Fuente: Gobierno de la Ciudad de México (2016)

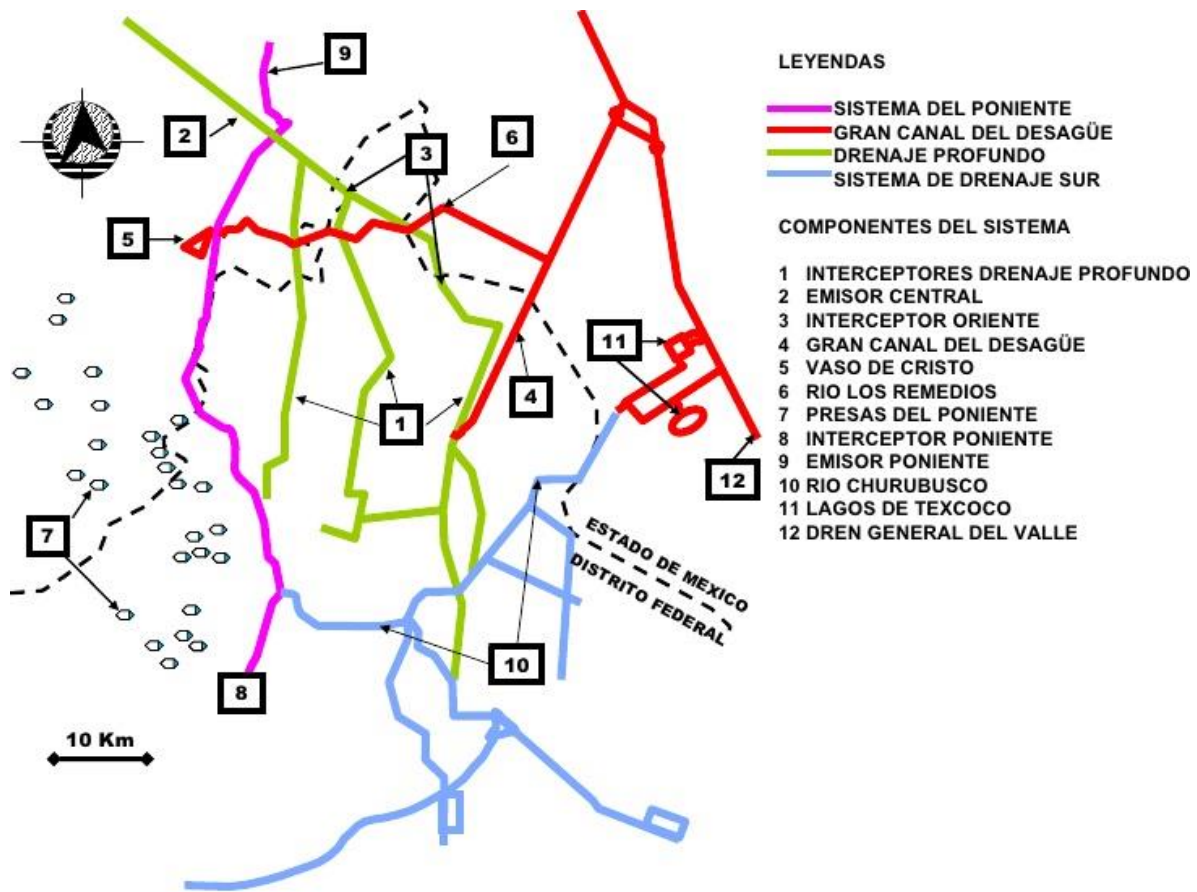


Figura 2.15.- Sistema de Drenaje Profundo

Fuente: Instituto de Ingeniería, UNAM (2006)
 Disponible en: <http://slideplayer.es/slide/1721140/>

4.-Red Primaria: Esta red está compuesta por 128 sistemas de colectores y 2,087 km de tuberías con diámetros que van de los 60 cm hasta 4 m. Esta red conduce aguas combinadas mediante la operación de 87 plantas de bombeo, 12 tanques de tormenta, 22 sifones, 13 lagunas de regulación y 20 presas (CONAGUA 2013).

5.-Red Secundaria: Está compuesta por 10,257 km de tuberías con un diámetro de 45 cm que colectan aguas provenientes de las descargas domiciliarias (CONAGUA 2013).

6.-Túnel Emisor Oriente: Para duplicar la capacidad del drenaje de la CDMX, en 2008 comenzó la construcción del Túnel Emisor Oriente (TEO), con una longitud de 62 km, un diámetro de 7 m y 24 lumbreras. Es una salida complementaria al Emisor Central. En 2013 comenzó a operar la primera etapa (10 km), con la planta de Bombeo el Caracol. El TEO

tendrá una capacidad de 150 m³ /s, iniciando en el Río de los Remedios y desembocando en el río El Salto en el Estado de Hidalgo, en el mismo punto que el Emisor Central (Drenaje Profundo). Además, el TEO conducirá las aguas residuales hacia la Planta de tratamiento Atotonilco, una vez que esta inicie operaciones (SACM 2012)(Figura 2.16).

Con respecto al tratamiento de las aguas residuales, aunque existe una capacidad instalada para tratar 6,821 l/s en 29 plantas en la CDMX, la cobertura para este servicio es aún insuficiente, ya que solamente se logra tratar el 13.6% del total de aguas residuales producidas (CONAGUA 2014b y CONAGUA 2015a). Se espera que, una vez que la planta de tratamiento de aguas residuales de Atotonilco opere a su capacidad máxima, se logren tratar cerca del 100% de las aguas residuales producidas en la CDMX, ya que dicha planta cuenta con una capacidad promedio total de 35 m³/s, que es mayor a los 22.51 m³/s que produce actualmente la urbe (SACM 2016).

A nivel regional, se estima que, actualmente, el 74.5% de las aguas residuales generadas en la RHA XIII no es tratado o es tratado deficientemente (CONAGUA 2012).

Aunque se utilizan diversos procedimientos para el tratamiento, el predominante para la CDMX es el de lodos activados, con 27 de 29 plantas operando con esta tecnología (ANEXO I) (CONAGUA-SEMARNAT 2014).

El proceso de lodos activados forma parte de los procesos de tratamiento secundario de aguas residuales y actualmente es uno de los más utilizados para el tratamiento de aguas residuales de tipo doméstico o municipal (Noyola et al. 2013). Este proceso consiste, de manera general, en la aeración de aguas residuales en tanques, dentro de los cuales se desarrollan microorganismos, con la finalidad de que metabolicen la materia orgánica disuelta. Posteriormente, los flóculos de microorganismos se separan mediante sedimentación en un tanque clarificador (Noyola et al 2013). Con esta tecnología se remueven del agua la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitrógeno, Fósforo, Sólidos Suspendedos Totales y Sólidos Sedimentables.

TÚNEL EMISOR ORIENTE

Y SISTEMA PRINCIPAL DE DRENAJE DEL VALLE DE MÉXICO

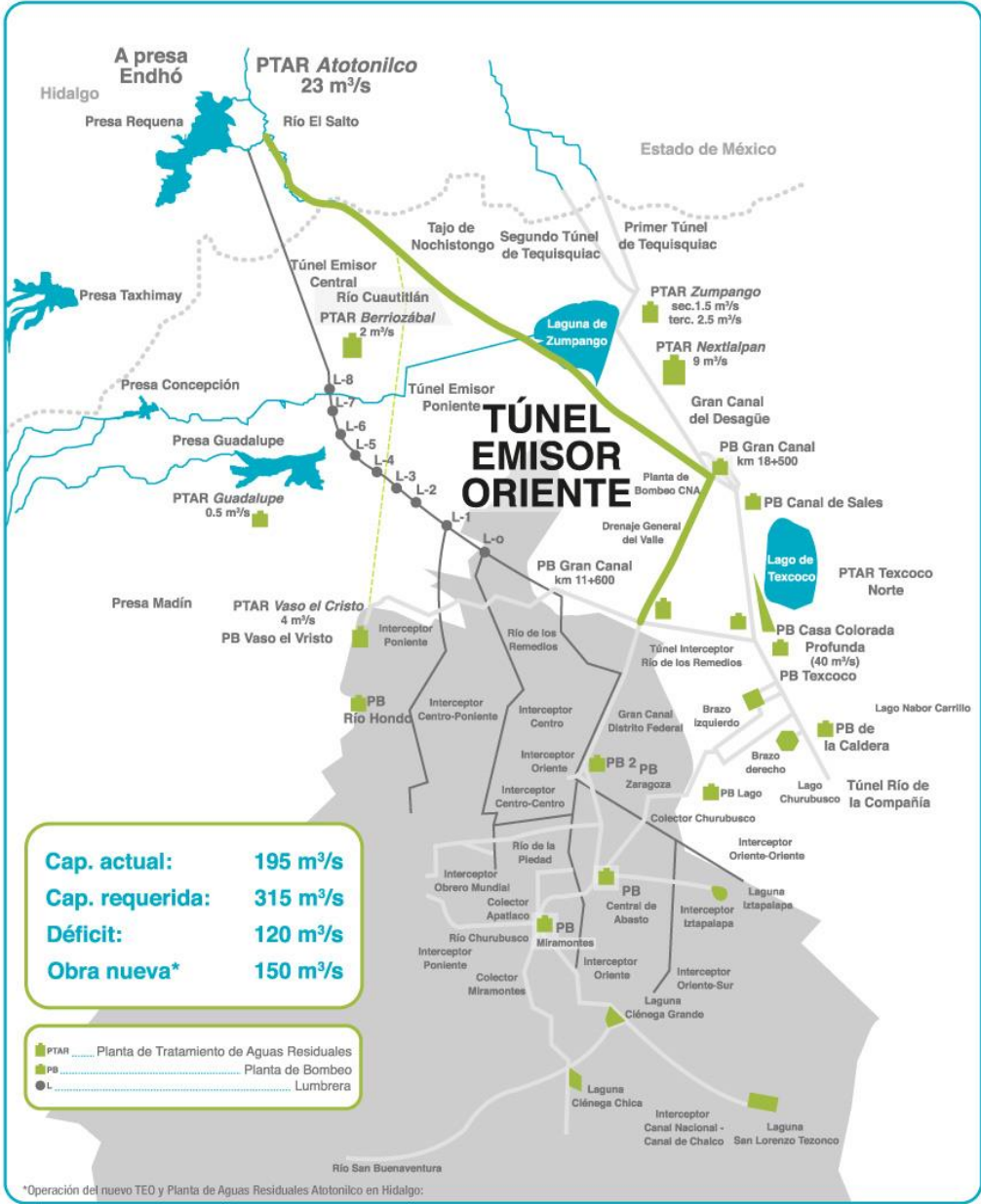


Figura 2.16.- Túnel Emisor Oriente⁵

Fuente: Gobierno de la Ciudad de México (2016).

Disponible en: http://www.cuidarelagua.cdmx.gob.mx/a_donde_va.html

⁵ Nota: No todas la PTAR que se encuentran indicadas en la Figura se encuentran construidas

2.3.5 Reúso y Vertido en el Cuerpo Receptor

Se estima que en la CDMX se genera un caudal de aguas residuales de 22.51 m³/s que, en su mayoría no recibían un manejo adecuado, ya que una gran proporción de éstas eran descargadas, sin tratamiento previo, hacia el Valle de Tula, en el estado de Hidalgo, donde eran utilizadas para riego agrícola. Posteriormente, la corriente que regresaba de la irrigación se descargaba hacia tributarios del río Panuco, desembocando finalmente en el Golfo de México (CONAGUA 2012 , Ontiveros-Capurata *et al.* 2013 y SACM 2016). En este caso, se trataba de un reúso inadecuado, ya que las aguas servidas no cuentan con la calidad requerida para el riego agrícola.

Actualmente, con la operación de la PTAR de Atotonilco se trata cerca del 60% (13.51 m³/s) del agua residual producida por la Ciudad de México. Dicho caudal es utilizado para riego en el Valle del Mezquital, como se mencionó anteriormente (Bello 2016).

Es importante mencionar que, dentro de los cuerpos receptores de mayor relevancia para la CDMX se encuentran las presas Endho, Requena, Rojo Gómez y Aguirre, ya que en estas se descarga el caudal de aguas residuales provenientes de la CDMX y de varios de los municipios pertenecientes a la ZMVM. A partir de dichas presas, el agua es distribuida mediante los canales de riego (Núñez García 2015).

En la CDMX el reúso⁶ del agua constituía, para el año 2015, solamente, entre el 5 y 7% del volumen total utilizado, es decir, entre 1.57 y 2.2 m³/s. El agua destinada a reúso era utilizada, en su mayoría, para riego agrícola (62%) en la zona sur de la Ciudad (San Andrés Míxquic, San Nicolás Tetelco, San Juan Ixtayopan, Tláhuac, Milpa Alta y Xochimilco). El volumen restante (38%) era destinado a riego de áreas verdes y, en menor medida, para fines recreativos, como es el llenado de lagos artificiales, lavado de autos o para usos industriales (Banco Mundial 2013 y CONAGUA 2013). Cabe mencionar que dentro de este volumen se encuentra considerado el abastecimiento a los canales y lagos de Xochimilco, Bosque de Chapultepec y Bosque de San Juan de Aragón (SACM 2016 y SACM 2016a).

⁶ El agua procedente del uso primario y debidamente tratada se conoce como agua para el reúso (Dautant 2016).

De acuerdo con el INEGI (2014), en la CDMX, entonces Distrito Federal, existían 177 puntos de descarga de aguas residuales delegacionales sin tratamiento, ubicados en 15 de las 16 delegaciones políticas, siendo Milpa Alta la única en la que no se reportaron. Aunque 37 de estos puntos correspondían al Gran Colector, los 150 restantes incluían cuerpos de agua, suelo, o barrancas, destacando el hecho de que las características de una proporción considerable no se especifican (Figura 2.17).

Actualmente se considera que el reúso del agua debe ser uno de los aspectos fundamentales a considerar en una gestión adecuada del recurso, ya que permite reincorporar el agua al sistema, aliviando la presión sobre las fuentes de suministro que, en no pocas ocasiones, están ubicadas a distancias considerables. En el mismo sentido, además de poder utilizarse en los rubros ya mencionados, puede ser utilizada en la recarga de acuíferos, e incluso, como fuente directa e indirecta de agua potable (Dautant 2016, de la Peña et al. 2013, Moeller et al. 2016, UNESCO 2017 y Soderberg 2016). Sin embargo, es importante tener en cuenta que el reúso eficiente del agua depende, en gran medida, de la existencia de una infraestructura de tratamiento adecuada que permita obtener agua con la calidad requerida para ser reutilizada (de la Peña et al. 2013 y UNESCO 2017b).

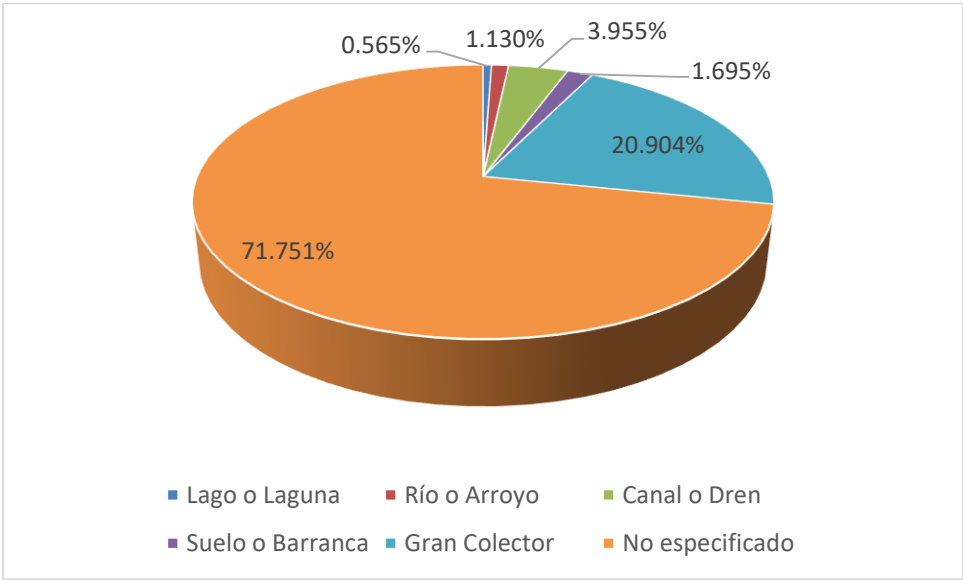


Figura 2.17.- Puntos de Descarga de Aguas Residuales Delegacionales sin Tratamiento

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2014)

2.3.6 Panorama General

Como se ha visto en los apartados anteriores, el sistema de gestión hídrica está constituido por diversos elementos, desde la captación hasta el vertido en el cuerpo receptor. En la Figura 2.18 se presenta un esquema simplificado de las principales etapas y flujos que integran el sistema en estudio.

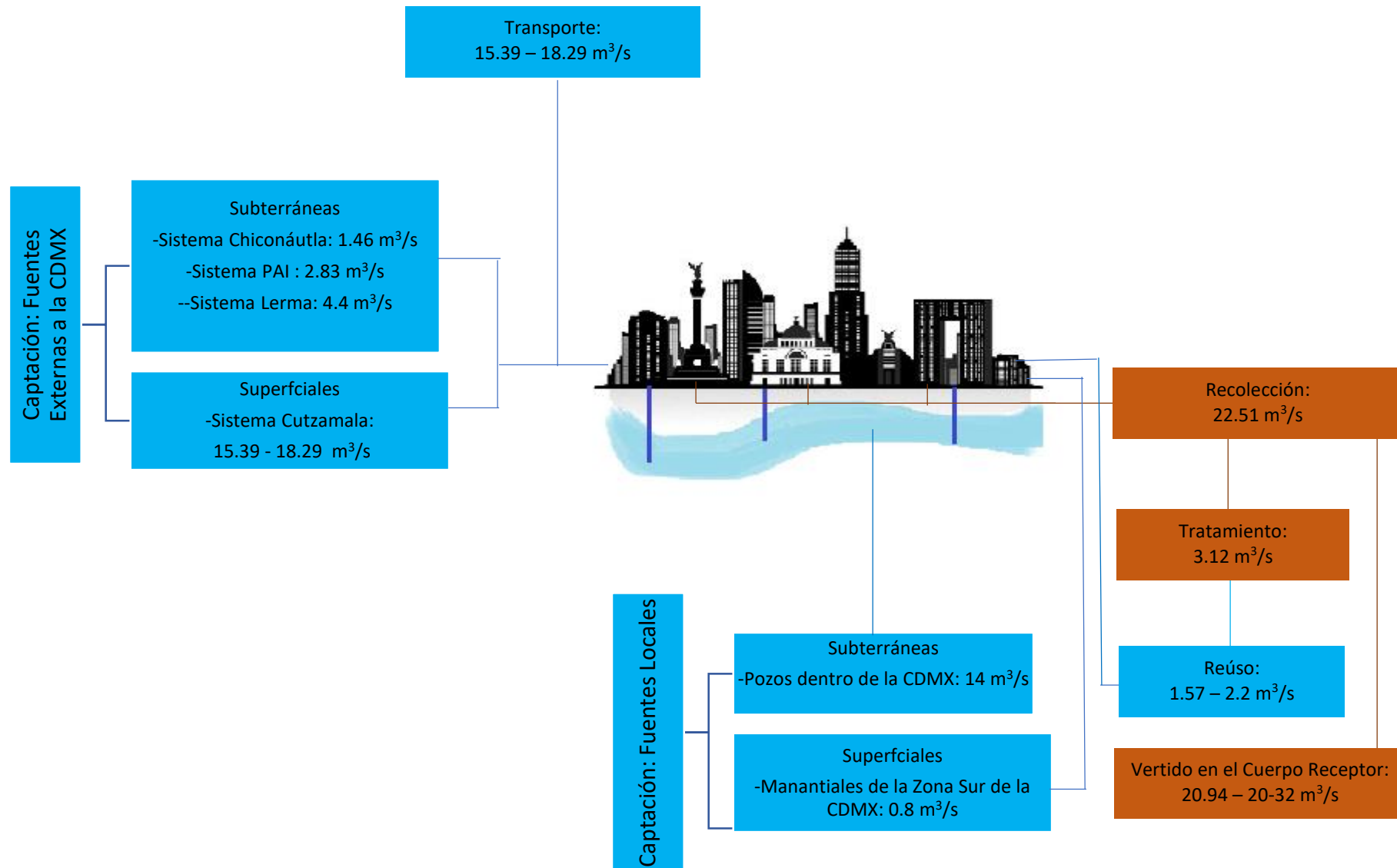


Figura 2.18.- Etapas y flujos principales del sistema de gestión hídrica de la Ciudad de México

2.4 Problemática del Agua en la CDMX

Para el año 2013, la CONAGUA reportó que la disponibilidad de agua para la RHA XIII, dentro de la que se ubica la CDMX era de 152 m³/hab/año, cantidad que contrasta notablemente con la media nacional, que era de 3,982 m³/hab/año (CONAGUA 2014a y PNH 2014).

La ZMVM, ha sido caracterizada como una zona con un estrés hídrico severo; es decir, está en una situación en la que las extracciones de agua superan en 40% a los recursos renovables. Se estima que de los 7 acuíferos que abastecen con agua subterránea a la zona, 4 (Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Chalco-Amecameca, Texcoco y Cuautitlán-Pachuca) se encuentran sobreexplotados, siendo esta la región de mayor presión hídrica del país (Banco Mundial 2013, CONAGUA 2013, CONAGUA 2014a, CONAGUA 2015a y GDF 2012). En contraste, en la CDMX, durante la temporada de lluvias se presentan precipitaciones intensas que provocan inundaciones de magnitudes considerables. Lo anterior debido, en gran medida, a que la ciudad se encuentra situada dentro de una cuenca endorreica que carece de un drenaje natural que permita el flujo del agua fuera de la misma. En consecuencia, la ocurrencia de estos fenómenos, hace indispensable el uso de medios artificiales para bombear el agua fuera de la cuenca, lo cual implica un consumo considerable de energía (Banco Mundial 2013).

Aunado a la problemática de la sobreexplotación de las fuentes de suministro locales, se tiene que las corrientes superficiales remanentes en la cuenca del Valle de México y, en particular en la CDMX, presentan problemas severos de contaminación, debido a las descargas de aguas residuales, como por ejemplo en el Río de la Compañía, siendo pocos los casos como el del Río Magdalena, en los que la calidad del agua constituye una fuente adecuada para su aprovechamiento (González Reynoso et al. 2010 y CONAGUA 2012).

Otro de los aspectos relevantes de la problemática del agua en la Ciudad, es el volumen de agua trasvasada de los sistemas Lerma y Cutzamala para satisfacer la demanda en la CDMX. En ambos casos, como ya se ha mencionado, el agua se “importa” de otra cuenca sin mediar un retorno de volúmenes de agua para su posterior recarga. Debido a la ausencia de una recarga adecuada y a las condiciones hidrometeorológicas prevalentes, la CONAGUA

reporta que durante el periodo 2003-2008 se redujo en 14% el caudal proveniente del Sistema Lerma (CONAGUA 2009).

Una de las preocupaciones crecientes en las operaciones de suministro de agua en las grandes ciudades, es la relacionada con el consumo de energía, la cual, en su mayoría, en el caso de la CDMX, es termogenerada, de manera que la energía utilizada para su extracción, bombeo, distribución, tratamiento y potabilización, está relacionada estrechamente con la emisión de gases de efecto invernadero y demás contaminantes atmosféricos. De acuerdo con el INEGI (2016), la CDMX es abastecida por 6 centrales generadoras termoeléctricas (turbogas), con una capacidad efectiva de 266 Megawatts (INEGI 2016). En el mismo sentido, para la CDMX, se reportan, para el año 2015, 847 contratos para el rubro de bombeo de aguas potables y negras comprendidos dentro de la tarifa 6⁷, con un consumo de 395,232 Megawatts-hora y una facturación de \$738,523,000.00 pesos para el periodo citado (Figuras 2.19 y 2.20). Para este periodo, el consumo total de energía del Sistema de Gestión Hídrica de la Ciudad de México, incluyendo las operaciones de bombeo del sistema Cutzamala (2280 GWh), ascendía a 2675.232 GWh que constituye el 0.93% del total de la energía consumida en el país (288,232 GWh) (INEGI 2016, SENER 2016 y CONAGUA 2016b).

⁷ De acuerdo con la Comisión Federal de Electricidad (CFE), esta tarifa se aplicará al suministro de energía eléctrica para servicio público de bombeo de aguas potables o negras. Información disponible en: <http://www.cfe.gob.mx/paginas/home.aspx>.

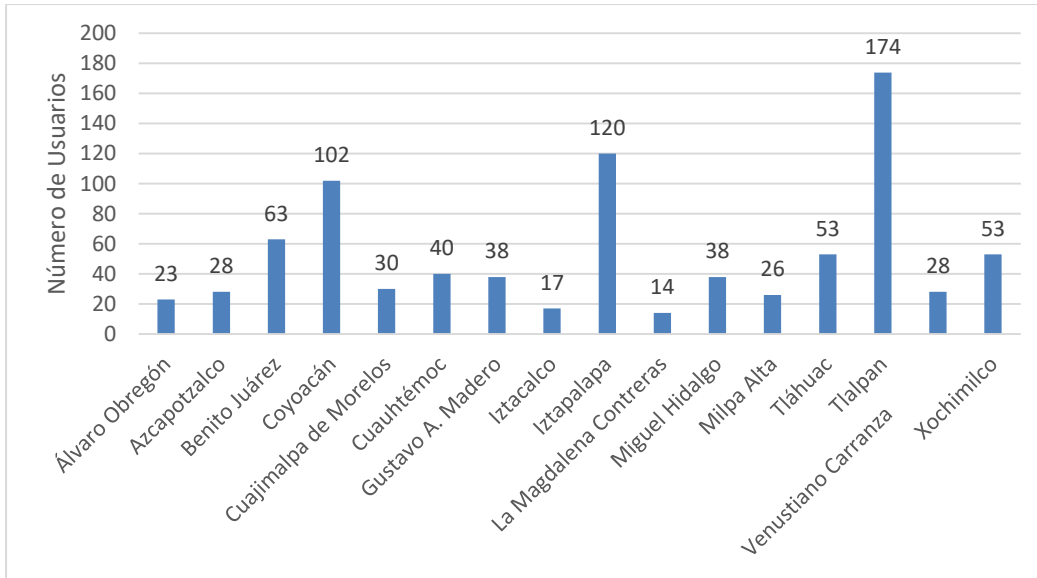


Figura 2.19.- Usuarios⁸ de Energía Eléctrica por Delegación para el Bombeo de Aguas Potables y Negras

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2016)

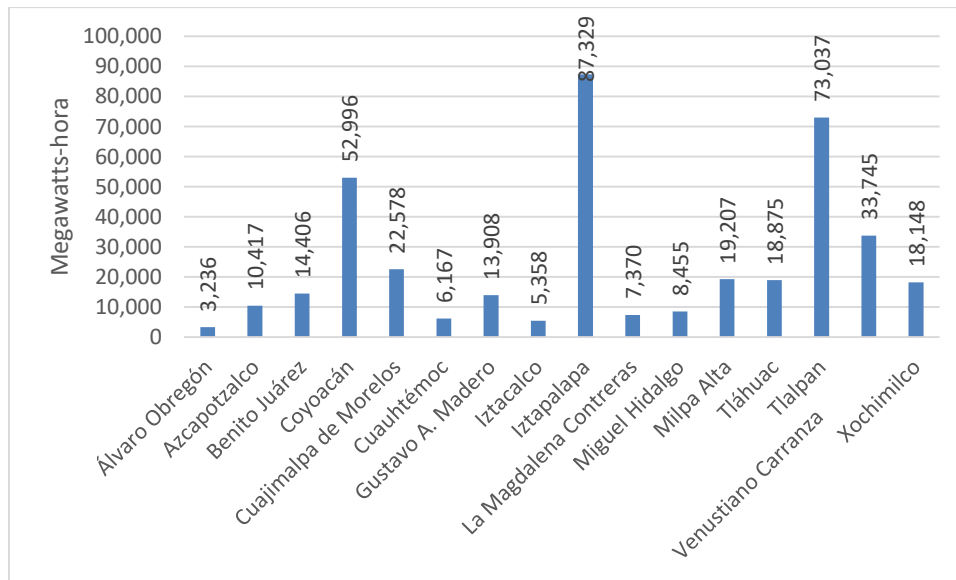


Figura 2.20.- Volumen de las Ventas de Energía Eléctrica por Delegación para el Bombeo de Aguas Potables y Negras

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2016)

⁸ Se refiere a contratos correspondientes a la tarifa 6.

De acuerdo con el Foro Económico Mundial (WEF 2009), la extracción de un millón de litros de agua del subsuelo (considerando una profundidad de 122 m), tendría un costo energético de aproximadamente 530 kWh, en tanto que el tratamiento del mismo volumen de agua residual requeriría de un gasto energético de aproximadamente 660 kWh. Cabe destacar que, además, en el caso de la CDMX el agua que se suministra desde el sistema Lerma vence un gradiente altitudinal considerable (1,100 m aproximadamente), aspecto que se suma al consumo de energía utilizado para la extracción. Asimismo, el consumo de energía debido a la distribución de agua en la red secundaria, es otro aspecto importante a considerar (CONAGUA 2014a).

En el mismo sentido, es importante señalar que, de acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA 2010), en 2010 México emitía 454.83 g de CO₂ por kWh de energía generada, de manera que, la extracción de un millón de litros de agua (1000 m³) del subsuelo, implicaría la emisión de 241.15 kg de CO₂ a la atmósfera, que corresponde a aproximadamente 241.15 g de CO₂ / m³. En consecuencia, una de las áreas de oportunidad que se consideran para el aprovechamiento sustentable de energía en el país es, precisamente, en la del mejoramiento de los sistemas y equipos utilizados para el bombeo de agua (INE 2012).

Con respecto al tratamiento de aguas residuales, como ya se mencionó, se cuenta con una capacidad instalada insuficiente para el tratamiento del caudal producido por la CDMX. En este sentido, es importante considerar que la puesta en operación de la nueva planta de tratamiento de Atotonilco, en el Estado de Hidalgo, incrementará considerablemente la capacidad instalada, ya que estará en posibilidades de tratar 35 m³ / s , alcanzando así el 60% del saneamiento para el Valle de México (GDF 2012 y SEMARNAT-CONAGUA 2014a). En este ámbito, cabe mencionar que el tratamiento eficiente de aguas residuales es un proceso relevante para el país desde el punto de vista de la mitigación de la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera (Noyola et al. 2016). En este contexto, es de especial interés tener en consideración la liberación de metano a la atmósfera derivada de los procesos de tratamiento de aguas residuales, debido a su importancia como gas de efecto invernadero. En este sentido, cabe destacar que la planta de Atotonilco, con una capacidad de tratamiento de 35 m³/s, contará con un sistema de aprovechamiento de biogás que permitirá tener un

esquema de cogeneración de energía que le permita autoabastecer sus operaciones hasta en un 60% (SEMARNAT-CONAGUA 2014).

Aunado al punto anterior, es importante considerar que, aunque México ha sido pionero en el reúso del agua (Soderberg 2016). Sin embargo, este rubro es aún un área de oportunidad en el manejo sustentable del agua para la CDMX, en vista de que se cuenta con un caudal considerable de aguas residuales susceptibles de ser tratadas y aprovechadas como una fuente de suministro local (Soderberg 2016). Cabe mencionar que esta es una de las alternativas que han cobrado mayor fuerza en las últimas décadas a nivel mundial, debido al crecimiento de la demanda del recurso. Sin embargo, un porcentaje muy bajo del agua recibe tratamiento terciario que la haga susceptible de ser apta para el consumo humano (UNESCO 2017b).

Con respecto a las afectaciones del suelo, las operaciones que lo impactan de manera directa, debido a la ocupación del mismo, son las de potabilización y tratamiento, ya que se requiere la construcción de instalaciones especiales que implica la ocupación de terrenos y el cambio de uso de suelo, como es el caso de plantas potabilizadoras de gran tamaño como la de “Los Berros”, en el Estado de México, o la del Río Magdalena, construida en terrenos que anteriormente eran de tipo forestal. De acuerdo con la información compilada por Campos-López (2015), basada en información proporcionada por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, las plantas potabilizadoras que se encuentran en operación en la Ciudad de México ocupan una superficie promedio de 1114.51 m² por planta. Cabe mencionar, que las plantas de tratamiento de aguas residuales suelen ocupar áreas de mayor tamaño; sin embargo, sus dimensiones presentan mayor variación que las potabilizadoras.

Otra de las operaciones que afectan el suelo como unidad, es la extracción del agua subterránea, ya que la pérdida de volúmenes de la misma en el acuífero, provoca en la zona del antiguo lecho lacustre, la compresión de las arcillas y el fracturamiento de las capas superficiales, lo cual significa una pérdida irreversible en su calidad, como lo señalan Breña-Puyol y Breña-Naranjo (2009) y Oswald-Spring (2011). Aunque este tipo de hundimientos, inducidos por el bombeo de agua de pozos profundos ha afectado a la CDMX desde finales del siglo XIX, actualmente, una de las preocupaciones se enfoca en los daños considerables en la infraestructura, tanto de suministro como de desalojo de aguas residuales, que este proceso provoca (Auvinet y Juárez 2011, Breña-Puyol y Breña-Naranjo 2009 y Oswald-

Spring 2011). En este contexto, uno de los aspectos que genera una mayor preocupación, es el relativo a las pérdidas físicas del agua durante su transporte y distribución, mismas que se estiman entre 35 a 40% del total del agua distribuida (Arreguín et al. 1997, Breña Puyol y Breña Naranjo 2009, de la Peña et al. 2013, SACM 2012, UNESCO 2017).

Uno de los procesos involucrados en la operación de los sistemas de agua urbanos que afecta de manera más grave al suelo es el vertido de aguas residuales que no han sido previamente tratadas (UNESCO 2017). Un ejemplo de ello, es el vertido de aguas residuales hacia el valle de Tula a 80 km de distancia de la Ciudad de México (Distritos de riego 003 y 100; Tula y Alfajayucan, respectivamente), operación que implica afectaciones considerables a la calidad de los suelos agrícolas, ya que si bien las aguas residuales provenientes de la de CDMX son ricas en materia orgánica, también contienen metales pesados, microorganismos patógenos y compuestos orgánicos diversos (Figura 2.21) (Cifuentes *et al.* 1994, Downs et al. 1999, Lesser-Carrillo et al. 2011). Las aguas residuales se descargan, en primera instancia, en las presas Endho, Requena, Rojo Gómez y Aguirre, para ser distribuidas mediante los canales de riego. En este sentido, León Suematsu (1995) señala que este tipo de descargas pueden provocar la bioacumulación de elementos y compuestos tóxicos, además del deterioro del suelo por un incremento en la tasa de salinización. Cabe mencionar que este es el ejemplo de reúso no planeado de agua de mayor envergadura en el mundo, ya que maneja un caudal aproximado de 52 m³/s que es utilizado para regar más de 85,000 hectáreas (Ontiveros-Capurata *et al.* 2012 y UNESCO 2017b). Asimismo, las aguas que siguen su cauce a través del río Pánuco, hasta desembocar en el Golfo de México, tienen un impacto negativo considerable.

Además, el vertido, en el territorio de la CDMX, de aguas residuales en lagos, ríos, lagunas, canales y barrancas provoca afectaciones considerables, ya que produce daños en los ecosistemas remanentes en barrancas y cuerpos de agua, además de contaminar el suelo y ser una fuente potencial de contaminación del acuífero (González Reynoso et al. 2010, INEGI 2014, PAOT 2010a, PAOT 2010b y UNESCO 2017b).

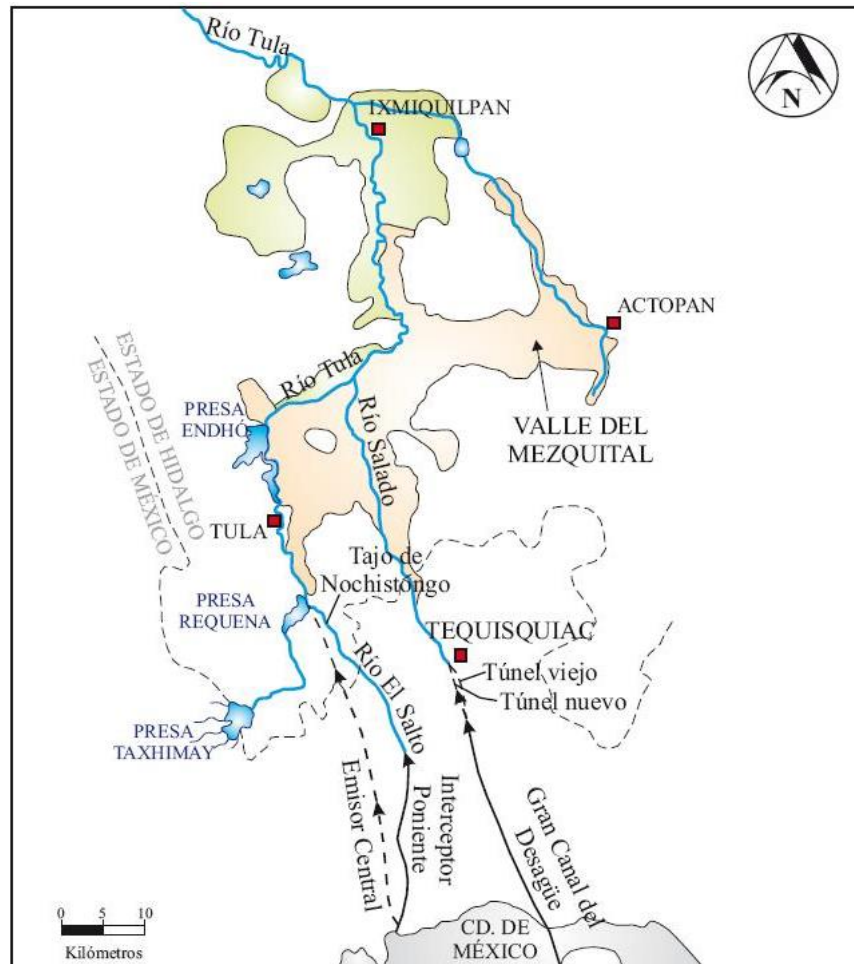


Figura 2.21.- Descarga de Aguas Negras desde la Ciudad de México Hacia el Valle del Mezquital, Hidalgo

Fuente: Lesser-Carrillo et al. (2011)

Debido a la problemática antes expuesta y con la finalidad de mantener e incrementar el suministro de agua en la CDMX, se han explorado nuevas fuentes de abastecimiento. Tal es el caso de la exploración de acuíferos profundos. En este ámbito, cabe mencionar que en la CDMX se han realizado, en los últimos 5 años, perforaciones de más de 2km de profundidad en las zonas de Iztapalapa e Iztacalco para evaluar nuevas fuentes de suministro de agua. Como resultado de estos estudios, a finales de 2017, entró en operación el Sistema de Pozos Profundos de la Ciudad de México, el cual cuenta, actualmente, con 4 pozos a más de 2km de profundidad en Iztapalapa (Santa Catarina), los cuales aportan un caudal de 100 L/s (Morales-Casique *et al.* 2014, SACM 2016b y Presidencia de la República 2017).

Por otra parte, continúa el desarrollo de proyectos de infraestructura para trasvasar agua de otras cuencas, como los de Tecolutla-Necaxa, Temascaltepec y Tula-Mezquital, con gasto de 12 m³/s , 6 m³/s y 4.2 m³/s, respectivamente (CONAGUA 2015b). Sin embargo, como señalan Escolero et al. (2016), *la problemática del suministro de agua en la CDMX va mas allá de sus fuentes e incluye un complejo sistema de captación y conducción que enfrenta fuertes limitaciones.*

2.5 Generación de Energía Eléctrica en México

Para el año 2015, la capacidad instalada del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) era de 68,044 MW, de los cuales el 71.7% correspondía a centrales eléctricas convencionales y el 28.3% a centrales eléctricas con tecnologías limpias. Estas últimas registraron un crecimiento anual de 6.9% al cierre de 2015, como resultado de la instalación de nuevas centrales eólicas y geotérmicas (SENER 2016).

Dentro de las modalidades de generación, la mayor parte corresponde a las centrales eléctricas propiedad de la CFE (61.6%), seguida por las centrales de Productores Independientes de Energía (PIE's) (19.0%) y los esquemas de autoabastecimiento (19.4%) (SENER 2016).

Con respecto a las tecnologías utilizadas, la SENER (2016) reporta que las centrales de ciclo combinado son las dominantes, ocupando el 50% de la generación de energía a nivel nacional (Figura 2.22).

Durante 2015, en México se generaron 309,553 GWh de energía eléctrica, de los cuales el 79.7% provino de tecnologías convencionales y el porcentaje restante (20.3%) de tecnologías limpias (SENER 2016).

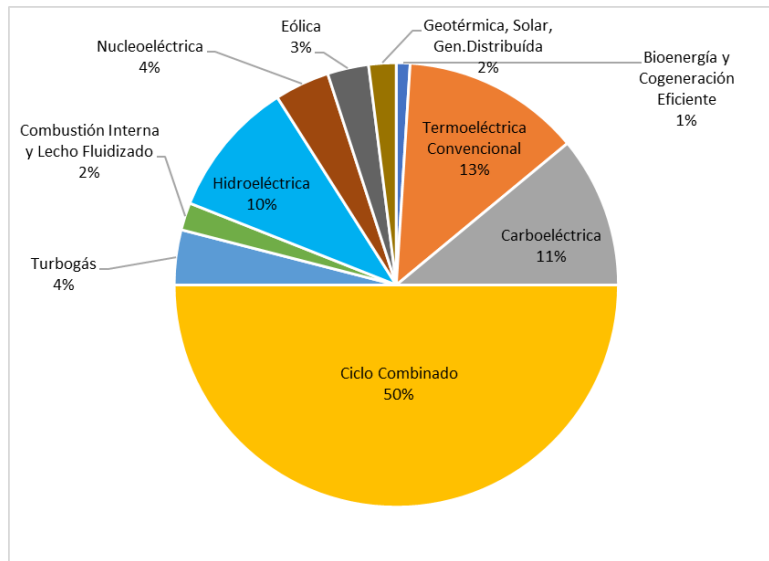


Figura 2.22.- Generación de energía eléctrica por tipo de tecnología (2015)

Fuente: SENER 2016

Dentro de las tecnologías convencionales se encuentran las centrales que generan energía eléctrica mediante el uso de combustibles fósiles y no cuentan con tecnología que permita la captura de CO₂. Esta categoría incluye las siguientes tecnologías: carboeléctrica, ciclo combinado, combustión interna, lecho fluidizado, termoeléctrica convencional y turbogás (SENER 2016). Se estima que, en México, para el 2015, este tipo de tecnologías contribuían con el 19% de las emisiones totales de Gases de Efecto Invernadero a nivel nacional (Aproximadamente 127 mil millones de toneladas de CO₂) (SENER 2016).

Aunque las tecnologías convencionales son diversas en términos de eficiencia y emisiones, las plantas de ciclo combinado presentan una eficiencia superior a otras tecnologías aún utilizadas en el país, además de que reportan cantidades menores de emisiones por MWh generado, como se observa en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6.- Tecnologías convencionales para la producción de energía eléctrica utilizadas en México (2015)

Tecnología	Emisiones (kg CO ₂ /MWh)	Unidades en Operación
Ciclo Combinado	325	63
Termoeléctrica Convencional	680	67
Carboeléctrica	603	3
Lecho Fluidizado	Dependiente del Combustible	2
Turbogás	510	126
Combustión Interna	692	265

Fuente: SENER (2016)

2.6 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El Análisis de Ciclo de Vida Ambiental o Análisis de Ciclo de Vida (ACV), es una metodología desarrollada para proveer elementos que permitan tomar decisiones en materia de sustentabilidad. El objetivo principal es la evaluación de los impactos ambientales debidos a la provisión de un servicio o a la elaboración de un producto, mediante el análisis de las entradas y las salidas de materiales y energía durante todo el periodo de su existencia (Joshi 2000).

Una de las ideas más relevantes de la metodología, es que considera que el mejoramiento de procesos a pequeña escala llevará a mejoras ambientales a gran escala (Heijungs y Guinée 2012).

La International Organization for Standardization (ISO), ha desarrollado los lineamientos para la aplicación adecuada de la metodología. Para ello se cuenta con las normas de la serie 14040/44 (ISO 2006), en las cuales se detalla la forma en la que se debe conducir cada una de las etapas del proceso.

El ACV, tiene las siguientes etapas:

Definición del objetivo y alcance: El objetivo debe plantearse considerando la aplicación que se busca dar al ACV, las razones por las que se lleva a cabo el estudio y el público al que va dirigido el mismo. Asimismo, en esta etapa se debe delimitar claramente el estudio, mediante la descripción y delimitación, tanto espacial como temporal, del sistema en

cuestión. En el mismo sentido, se deben definir, como parte de la delimitación del sistema, los procesos unitarios que se incluirán en el ACV (Güereca Hernández 2006).

En esta etapa también se debe definir la unidad funcional con la que se trabajará. La unidad funcional se refiere a la cantidad de productos o servicios necesarios para cumplir la función que se compara, además de que sirve de base para la comparación entre sistemas. Cabe mencionar que a partir de la unidad funcional se cuantifican las entradas y salidas funcionales de un sistema productivo o de servicios (Heijungs y Guinée 2012).

Análisis del inventario de ciclo de vida (ICV): Esta etapa comprende la obtención de datos, así como los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas (materias primas y energía) y salidas (emisiones a la atmósfera, descargas al suelo y al agua) más relevantes de un sistema, tomando como referencia la unidad funcional (Figura 2.23). Cabe destacar, que el inventario se construye con base en los procesos unitarios⁹ definidos en la etapa anterior (Heijungs y Guinée 2012 e ISO, 2006).

Evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV): En esta etapa se evalúa la magnitud e importancia de los impactos ambientales potenciales del producto o servicio a lo largo de su ciclo de vida con base en la información del inventario, la cual se asocia con impactos ambientales específicos utilizando las metodologías pertinentes en función de los objetivos del estudio.

Las categorías generales de impacto son: agotamiento de recursos, salud humana así como impactos ecológicos y globales. Estas categorías generales se operacionalizan mediante impactos específicos, tales como: calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono acidificación y eutrofización, entre otras (Heijungs y Guinée 2012 e ISO, 2006).

De acuerdo con ISO 4042, la etapa de EICV contiene elementos obligatorios y opcionales de acuerdo con lo siguiente:

⁹ Entendiendo a los procesos unitarios como los elementos mínimos a considerar en el ciclo de vida, para los cuales se cuantifican las entradas y las salidas.

a) Elementos Obligatorios:

- **Selección:** Selección de categorías de impacto y métodos de caracterización a utilizar
- **Clasificación:** Asignación de los datos del inventario a categorías de impacto específicas
- **Caracterización:** Cálculo del indicador de impacto para cada una de las categorías seleccionadas

b) Elementos Opcionales:

- **Normalización:** Cálculo de la magnitud del indicador de impacto, usando información de referencia previamente caracterizada por el mismo método.
- **Agrupación:** Proceso de clasificar por grupos de impacto similar o por jerarquías en una categoría determinada.
- **Valoración:** Se establecen factores que otorgan una importancia relativa a las distintas categorías de impacto para, posteriormente, sumarlas y obtener un resultado ponderado en la forma de un índice ambiental global para el sistema.

En este punto, cabe mencionar que existen diversas metodologías para la EICV (P.ej. Eco-Indicator 99, EPS Method, LIME e Impact 2002+), sin embargo, el método ReCiPe es el enfoque más reciente y armonizado que involucra indicadores (Goedkoop et al. 2009 y Huijbregts et al. 2016). El objetivo de este método es transformar, mediante el uso de factores de caracterización, la información del inventario en un número limitado de puntajes de indicadores, donde los puntajes mencionados representan la severidad relativa del impacto analizado (Goedkoop et al. 2009 y Huijbregts et al. 2016).

En ReCiPe, a su vez, existen dos metodologías definidas en función del tipo de indicadores que utilizan:

- Metodología de Punto Medio: Utiliza dieciocho indicadores de punto medio
- Metodología de Punto Final: Utiliza tres indicadores de punto final

Los indicadores de punto medio se enfocan en problemas ambientales individuales, tales como acidificación o cambio climático, en tanto que los indicadores de punto final muestran el impacto ambiental en tres niveles de agregación: efecto en la salud humana, biodiversidad y escasez de recursos (Goedkoop et al. 2009 y Huijbregts et al. 2016).

Con base en lo anterior, es claro que los objetivos del ACV nos permitirán identificar cuál de las dos metodologías (punto medio, punto final) es pertinente aplicar. En el mismo sentido, es importante considerar que la metodología de punto final involucra una mayor incertidumbre.

Interpretación del ciclo de vida: En esta etapa, al ser la última en una ACV, corresponde a la evaluación de los resultados. Asimismo, en esta etapa, se plantean conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones, de acuerdo con el objetivo y alcance del estudio (ISO 2006).

Aunque las etapas del ACV se presentan de manera secuencial, cabe mencionar que se trata de un proceso altamente iterativo (Figura 2.24), tal como lo mencionan Heijungs y Guinée (2012), ya que constantemente se transita entre las etapas del ciclo y la interpretación, de manera que si la interpretación de una etapa nos indica que debemos obtener información de mayor calidad o bien redefinir las operaciones del ciclo, se debe realizar una iteración del proceso y redefinir y mejorar dichos aspectos.



Figura 2.23.- Esquema de Análisis del Inventario del Ciclo de Vida

Fuente: ISO 14040/44 (ISO, 2006)

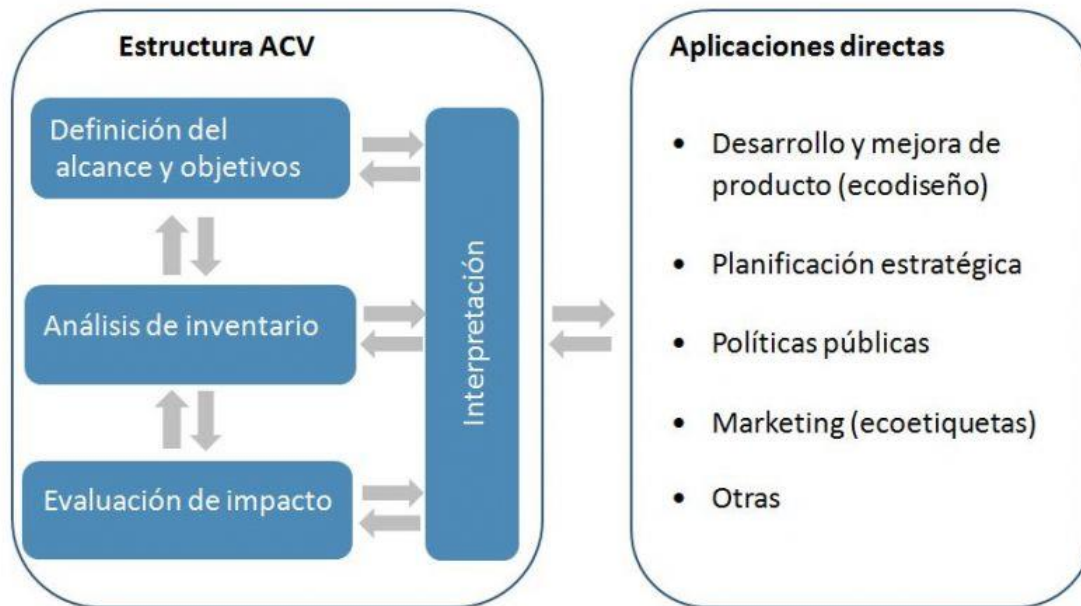


Figura 2.24.- Fases de un Análisis de Ciclo de Vida

Fuente: ISO 14040/44 (ISO, 2006)

Aunque se realizaron diversos trabajos previos relativos al impacto ambiental de la manufactura de productos y la provisión de servicios, no fue hasta 1990 que se estableció formalmente el término Análisis de Ciclo de Vida (Klöpffer 2006). En consecuencia, se ha trabajado intensamente en el desarrollo de herramientas informáticas para la realización de ACV, tales como Umberto, Simapro, Team y GaBi, y algunas herramientas de software libre, como OpenLCA, con la finalidad de agilizar la realización de los análisis y mejorar la precisión de los mismos. Cabe mencionar que algunas de las bases de datos más utilizadas para procesos y productos son: Ecoinvent y European Life Cycle Data, GaBi Professional, Swiss Input-Output y LCA Food, entre otras.

2.7 Categorías de impacto seleccionadas

Cambio climático

De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC 2007), el término Cambio Climático se refiere *a un cambio en el estado del clima que puede ser identificado (p.ej. usando pruebas estadísticas) por cambios en el promedio o en la variabilidad de sus propiedades y que persiste por un periodo prolongado de tiempo, típicamente décadas o más*. Cabe mencionar que este término se utiliza para referirse tanto a cambios debidos a procesos atmosféricos naturales como a los que son resultado de las actividades humanas.

En contraste, La Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático (UNFCCC) utiliza el mismo término para hacer referencia, al cambio en el clima atribuido directa o indirectamente a las actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera y que se suma a los procesos atmosféricos naturales.

En este contexto, uno de los procesos de mayor relevancia es el efecto invernadero, el cual ocurre cuando la radiación solar que incide sobre la superficie terrestre queda atrapada por los llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI). Dichos gases absorben la radiación

infrarroja impidiendo que se disipe a capas superiores de la atmósfera. Este proceso tiene como una de las consecuencias más relevantes el incremento en la temperatura terrestre denominado de manera general como calentamiento global (Tabla 2.7).

Tabla 2.7.- Gases que Contribuyen al Calentamiento Global

Gas	Potencial de calentamiento global (Global Warming Potentials, GWP) ¹
Dióxido de Carbono (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	25
Óxidos Nitrosos (N ₂ O)	298
Clorofluorocarbonos (CFC-11, -12, -13,-113, -114, -115)	4,750-14,400
Hidroclorofluorocarbonos (HCFC-22, -123, -124, -141b, -142b)	77-2310
Hidrofluorocarbonos (HFC-125, -134a, 143a, -152a)	124-14,800
Halones (1301, 1211, 2402)	1,640-1,890
Tetraclorometano (CCl ₄)	1,400
1,1,1-Tricloroetano (CCl ₃ CH ₃)	144
Monóxido de Carbono (CO)	1.9

¹Corresponde a un horizonte de tiempo de 100 años.

Fuentes: Stranddorf et al. (2005) y Forster et al. (2007).

Debido a lo antes expuesto, el calentamiento global es cuantificado utilizando los potenciales de calentamiento global (Global Warming Potentials, GWP) para las sustancias que tienen el mismo efecto que el CO₂ en la reflexión de la radiación térmica. Debido a esto, las unidades de los GWP son expresadas en CO₂-equivalentes (Stranddorf et al. 2005).

El cálculo de los valores de GWP se basa en el uso de modelos y es cuantificado para horizontes de 20, 50 y 100 años para GEI tales como el CO₂, CH₄, N₂O, CFC's, HCFC's, HFC's y compuestos halogenados (UNFCCC 1995).

En consecuencia, el GWP de un producto o proceso puede ser estimado calculando la cantidad de GEI emitidos por unidad funcional y el potencial para efecto invernadero dado en kg de CO₂-equivalentes por kg de gas emitido (Stranddorf et al. 2005).

Para la metodología de punto medio, el valor para GWP se calcula de la siguiente manera:

$$GWP_{x,T} = \frac{\int_0^T a_x \times [x(t)] dt}{\int_0^T a_r \times [r(t)] dt} ; \text{ donde:}$$

$GWP_{x,T}$ = potencial de cambio climático de la sustancia x con T como el horizonte de tiempo sobre el que se realiza el cálculo

a_x = eficiencia radiativa debida al incremento de una unidad en la abundancia atmosférica de la sustancia en cuestión.

$[x(t)]$ = es la abundancia dependiente del tiempo de la sustancia x

a_r = eficiencia radiativa debida al incremento de una unidad en la abundancia atmosférica del gas de referencia.

$[r(t)]$ = es la abundancia dependiente del tiempo del gas de referencia r

Reducción de la capa de ozono

La reducción o agotamiento de la capa de ozono se refiere al proceso que involucra reacciones químicas en la estratósfera que tienen como consecuencia la destrucción acelerada de las moléculas antes referidas. Aunque la formación y destrucción de las moléculas de ozono es parte de la dinámica de la tropósfera, son de interés particular las reacciones debidas a la presencia de compuestos químicos de origen antropogénico (PNUMA 2006).

Al grupo de compuestos de origen antropogénico involucrados en las reacciones químicas que destruyen las moléculas de ozono en la estratósfera se les llama Sustancias que Agotan la Capa de Ozono (SAO). Dichos compuestos han sido estudiados desde finales de la década de los 80 debido a la preocupación creciente por el adelgazamiento en la capa de ozono y a los efectos potenciales de este proceso sobre los seres vivos. Cabe mencionar que la capa de ozono estratosférico absorbe gran parte de las radiaciones UV-C y UV-B que son dañinas para los seres vivos (PNUMA 2006).

Las SAO antropogénicas son sustancias controladas que se clasifican en 7 grupos: clorometano (CH_3Cl), clorofluorocarbonos (CFCs), hidroclorofluorocarbonos

(HCFCs)/hidrobromofluorocarbonos (HBFCs), halones (clorofluorocarbonos bromados), tetracloruro de carbono (CCl₄), metil cloroformo (CH₃CCl₃) y bromuro de metilo (CH₃Br).

El Potencial de Destrucción de la Capa de Ozono (ODP por sus siglas en inglés “Ozone Depletion Potential”) ha sido definido como una medida relativa de la capacidad de destrucción de ozono de una SAO. Esta medida utiliza el CFC-11 (triclorofluorometano) como referencia y se expresa en kg de CFC-11 equivalentes (Goedkoop et al. 2013).

Debido a que la mayoría de las SAO se encuentran prohibidas, su uso ha ido en declive desde 2003. En consecuencia, para evaluar su impacto sobre la reducción de la capa de ozono se calcula el cambio marginal ΔOD_j que corresponde a la diferencia (en unidades de ktn de CFC-11 equivalentes) entre el mejor escenario A1 y el mismo escenario sin emisiones de SAO del grupo j desde 2003.

$$\Delta OD_j = \sum_{i \in j} \Delta m_i \cdot gODP_i(\infty) ; \text{ donde:}$$

Δm_i = cantidad evitada (kg) de SAO _{i} del grupo j desde 2003 hacia adelante

$gODP_i(\infty)$ = el factor de equivalencia de SAO _{i} (kg de CFC-11 eq por kg de SAO _{i})

Toxicidad humana

La toxicidad puede ser definida como la habilidad relativa de una sustancia para causar efectos adversos en los organismos vivos. Sin embargo, los efectos que puede provocar una sustancia tóxica en un organismo vivo dependen de una gran variedad de factores que van desde la ruta y tiempo de exposición, hasta las características del organismo afectado (Svarc-Gajic 2009).

Debido a la complejidad inherente a la cuantificación de los efectos tóxicos de diversas sustancias en los seres humanos, se utiliza el modelo USES-LCA 2.0 (Uniform System for the Evaluation of Substances adapted for LCA purposes), el cual es un modelo de destino multi-medio, exposición y efectos que permite calcular los factores de caracterización de punto medio para toxicidad humana (van Zelm et al. 2009).

El factor de caracterización (CF) de punto medio para esta categoría incluye un factor de destino y exposición, además de la parte químico-específica del efecto toxicológico humano y el factor de daño. La expresión correspondiente se presenta a continuación (Goedkoop et al. 2013):

$$CF = {}_i F_{r,i,x,g} \cdot E_{r,x,c/nc} ; \text{ donde:}$$

${}_i F_{r,i,x,g}$ representa la fracción de consumo de la población humana en la escala geográfica g que representa el transporte de la sustancia x a través de la ruta de ingestión r a partir del compartimiento de emisión i .

La expresión para obtener ${}_i F_{r,i,x,g}$ es la siguiente:

$${}_i F_{r,i,x,g} = \frac{\partial I_{r,x,g}}{\partial M_{i,x}} ; \text{ donde:}$$

$\partial I_{r,x,g}$ = es el cambio marginal en el consumo de la sustancia x por la población humana a través de la ruta r ($kg\ g\ día^{-1}$) a escala g .

$\partial M_{i,x}$ = cambio marginal en la emisión de la sustancia x al compartimiento i ($kg\ g\ año^{-1}$)

$E_{r,x,c/nc}$ representa el efecto humano y el factor de daño combinados para la sustancia x y la ruta r , considerando efectos cancerígenos y no cancerígenos.

La expresión para obtener $E_{r,x,c/nc}$ es la siguiente:

$$E_{r,x,c/nc} \approx 1.9 \frac{1}{ED50_{r,x,c/nc}} ; \text{ donde:}$$

$ED50_{r,x,c/nc}$ = dosis de la sustancia x durante toda la vida, a través de la ruta de exposición r , afectando al 50% de la población humana (kg), considerando efectos cancerígenos y no cancerígenos

El CF se expresa en cuantifica en unidades de 1,4-diclorobenceno equivalentes.

Formación de oxidantes fotoquímicos

En esta categoría de impacto se cuantifica la formación de ozono (O_3) troposférico resultante de las reacciones que involucran compuestos volátiles distintos del metano (NMVOC). El ozono es un contaminante secundario, indeseable en la tropósfera que puede provocar efectos tóxicos en plantas y animales (incluidos los humanos). Incluso se pueden detectar daños en concentraciones relativamente bajas (50ppb) (Farrell 2015).

El ozono es el oxidante más importante de la atmósfera, siendo de importancia, además, debido a que su vida media es de 22 ± 2 días (Farrell 2015 y The Royal Society 2008).

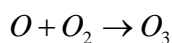
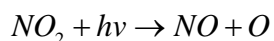
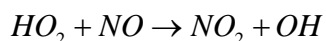
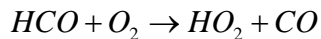
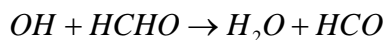
Aunque existen diversas reacciones que tienen como resultado la formación de ozono troposférico, para esta categoría de impacto es de interés, como ya se mencionó, la que involucra a los compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (NMVOC). Dichas reacciones se presentan de forma resumida a continuación:

Reacciones previas:

Formación de formaldehído



Reacciones en la atmósfera:



El factor de caracterización para esta categoría es el potencial de formación de oxidantes fotoquímicos, es cual esta expresado en kg de NMVOC liberados a la atmósfera.

Acidificación terrestre

De acuerdo con la FAO (2015), la acidificación del suelo es la disminución del pH debida a la acumulación de iones de H^+ y Al^{3+} y a la pérdida de cationes básicos tales como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ . Una de las principales consecuencias de este proceso es la disminución de la capacidad del suelo para albergar especies vegetales nativas.

Entre las principales causas de acidificación del suelo se encuentran los eventos prolongados de precipitación, drenaje de suelos potencialmente ácidos, deposición ácida, aplicación excesiva de fertilizantes a base de amonio, entre otras. Aunque existen procesos ambientales que contribuyen a la acidificación de los suelos, las principales emisiones acidificantes de origen antropogénico corresponden a NO_x , NH_3 y SO_2 .

La saturación de base (BS) ha sido utilizada como indicador que expresa la acidez. El BS es el grado en que el complejo de adsorción de un suelo está saturado con cationes básicos diferentes al hidrógeno y aluminio. Se define como la suma de los cationes básicos (BC en equivalentes/kg de suelo) dividido por la Capacidad de Intercambio de Cationes (CEC equivalentes/kg de suelo) y multiplicado por 100 (Goedkoop et al. 2013). La expresión correspondiente se muestra a continuación:

$$BS = \frac{BC}{CEC} = \frac{[K] + [Ca] + [Mg] + [Na]}{[H] + [K] + [Ca] + [Mg] + [Na]}$$

Para valores altos de BS, se entiende que hay más cationes básicos presentes, los cuales mejoran la capacidad de amortiguación del suelo para sus equivalentes ácidos.

En el factor de caracterización de punto medio correspondiente a los potenciales de acidificación terrestres (TAP por sus siglas en inglés), solamente el Factor de Destino (FF por sus siglas en inglés) es de importancia. Por ello se utiliza un FF para la acidificación independiente de la ubicación ($m^2 \cdot \text{año} \cdot \text{kg}^{-1}$), de acuerdo con lo siguiente (Goedkoop et al. 2013):

$$TAP = \frac{FF_x}{FF_{SO_2}} ; \text{ donde:}$$

$$FF_x = \frac{\sum_j (\Delta BS_j \times A_j)}{\Delta M_x} ; \text{ donde:}$$

A_j = tamaño del área de bosque j (m^2)

ΔM_x = cambio marginal en la emisión de la sustancia acidificante x ($kg \text{ año}^{-1}$)

Con base en esto, el TAP se expresa en kg de SO_2 equivalentes.

Eutrofización del agua dulce

La eutrofización es un proceso de enriquecimiento excesivo de nutrientes en cuerpos de agua, el cual tiene como resultado problemas asociados con el desarrollo excesivo de macrofitas, algas o cianobacterias. Aunque el desarrollo de los organismos antes mencionados es necesario para sostener la red trófica del ecosistema, el crecimiento excesivo puede provocar un deterioro severo al cuerpo de agua en cuestión (Manahan 2007). Este proceso se debe a la disponibilidad, en exceso, de factores de crecimiento limitantes requeridos para la fotosíntesis.

Aunque la eutrofización de los cuerpos de agua es un proceso natural, debido a los aportes de sedimentos, es importante considerar que las actividades humanas pueden acelerar dicho proceso mediante la descarga de nutrientes. Dentro de los macronutrientes más importantes se encuentran el carbono (CO_2), el hidrógeno, el oxígeno, el nitrógeno (NO_3^-), fósforo, potasio, azufre (sulfatos), magnesio y calcio (Manahan 2007). Es importante mencionar que la descarga de aguas residuales ricas en nitratos y fosfatos, así como la contaminación por fertilizantes, aceleran de manera significativa el proceso de eutrofización en los cuerpos de agua.

Para esta categoría de impacto el modelo utilizado es denominado CARMEN (Cause effect Relation Model to support Environmental Negotiation), el cual calcula el cambio en las cargas de nutrientes en aguas superficiales, aguas continentales y zonas costeras a partir de los cambios en emisiones netas de nutrientes. Modela el transporte de nutrientes desde una fuente de suministro agrícola y

deposiciones atmosféricas a través del drenaje de aguas subterráneas y corrientes superficiales, considerando aspectos espaciales. Asimismo, modela el transporte de nutrientes emitidos por plantas de tratamiento de aguas residuales. De esta manera, CARMEN puede ser utilizado para establecer el destino o factores de exposición para eutrofización de los cuerpos de agua (Goedkoop et al. 2013). Este modelo considera 3 categorías de fuentes: suministro agrícola de estiércol y fertilizante (fuentes difusas), nitrógeno y fósforo de efluentes (fuentes puntuales) de plantas de tratamiento industriales y comunitarias y deposiciones aéreas (Goedkoop et al. 2013).

Debido a que el modelo CARMEN no contiene las relaciones entre las emisiones de N al aire y su posterior deposición, se aplica el modelo EUTREND para calcular las deposiciones en la tierra y en los mares. Con base en esto, se han establecido los porcentajes siguientes a la emisión de nitrógeno proveniente de la cubierta de suelos agrícolas: 31% debido a NH_y atmosférico y deposición de NO_x , 28% debido a estiércol y 41% al suministro de fertilizantes (Goedkoop et al. 2013). La eliminación debida a desnitrificación en zonas anaerobias en cuerpos de agua dulce es tratada como una constante con una remoción genérica de 30%; en consecuencia, el 70% de la entrada de nitrógeno se transporta al mar.

Con CARMEN es posible calcular el factor de destino (FF por sus siglas en inglés)(en años/ km^3) para eutrofización acuática del nutriente x emitido en Europa, de acuerdo con lo siguiente:

$$FF_x = \frac{\partial C_{x,j}}{\partial M_x} ; \text{ donde:}$$

$\partial C_{x,j}$ = incremento de la concentración marginal en tn / km^3 en el sistema acuático expuesto j

∂M_x = incremento marginal de la tasa de emisión en $tn / año$

Finalmente, con base en el cálculo de los valores de FF_x y con la información que se presenta en la Tabla 2.8 se procede a calcular el potencial de eutrofización, el cual está expresado en kg de P equivalentes.

Tabla 2.8.- Factores de Destino (factores de caracterización de punto medio) y potenciales de eutrofización de agua dulce

Tipo de emisión	Compartimiento	Factor de destino (año/km ³)	Potencial de eutrofización
Fósforo de estiércol	Suelo	1.72 x 10 ⁻⁵	0.050
Fósforo de fertilizantes	Suelo	1.83 x 10 ⁻⁵	0.053
Fósforo proveniente de plantas de tratamiento de aguas residuales	Agua dulce	3.44 x 10 ⁻⁴	1

Fuente: Goedkoop et al (2013)

Ecotoxicidad terrestre

En esta categoría se incluyen los efectos tóxicos resultantes de la emisión de compuestos en los ecosistemas terrestres. Al igual que el caso de la toxicidad humana, se utiliza el modelo USES-LCA 2.0 (van Zelm et al. 2009).

En esta categoría, el factor de caracterización (CF) de punto medio incluye un factor de destino ($FF_{j,i,x}$) y la parte químico-específica del factor de efecto (dTU/dC) (Goedkoop et al. 2013), de acuerdo con lo siguiente:

$$FF_{j,i,x} = \frac{\partial C_{j,x}}{\partial M_{i,x}} ; \text{ donde:}$$

$\partial C_{x,j}$ = cambio marginal en la concentración disuelta en estado estacionario de la sustancia x en el compartimiento j ($kg\ g^{-3}$)

$\partial M_{i,x}$ = cambio marginal en la emisión de la sustancia x al compartimiento i ($kg\ año^{-1}$)

Como el enfoque es en los cambios marginales en los daños ecológicos debidos a cambios marginales en la producción de bienes y servicios, el factor del efecto toxicológico para la substancia x es el siguiente:

$$\frac{\partial PDF_{tox}}{\partial C_x} = \frac{\partial PDF_{tox}}{\partial TU_k} \frac{\partial TU_k}{\partial C_x} ; \text{ donde:}$$

PDF_{tox} = fracción potencialmente desaparecida de especies debida a la toxicidad

TU_k = es la toxicidad efectiva (en unidades de toxicidad) de un grupo de contaminantes con el mismo modo de acción

C_x = es la concentración ambiental de la substancia x con modo de acción k

El factor de caracterización se expresa en kg de 1,4-diclorobenceno equivalentes.

Agotamiento del agua

Debido a que el agua es un recurso distribuido de manera heterogénea en el mundo, los impactos derivados de su uso difieren de una región a otra y su estimación es complicada. En consecuencia, y en virtud de que actualmente no existe un modelo que integre de manera adecuada dicha información, el indicador de punto medio para esta categoría es únicamente la cantidad (m³) de agua utilizada (Goedkoop et al. 2013). Sin embargo, se especifica en el proceso del ACV el origen del agua que se está utilizando, es decir, si se trata de agua proveniente de un lago, un río, un pozo y no especificada pero de origen natural.

Agotamiento de metales

Los metales, al igual que otros recursos estratégicos se encuentran distribuidos de manera heterogénea en la superficie terrestre. Asimismo, los yacimientos, en su mayoría, corresponden a diversos minerales que se encuentran mezclados en proporciones diversas.

Es por ello que la evaluación del impacto de la extracción de dichos materiales es complicado.

La metodología ReCiPe establece, en primera instancia el cálculo del daño, el cual es expresado en dólares americanos (US\$)(valor presente en 2000) de acuerdo con lo siguiente:

$$Daño = \sum_{t=1}^T \left(\frac{\Delta C_{kg}}{\Delta Y_{kg}} \times P_{kg,t} \times \Delta Y_{kg} \times \frac{1}{(1+d)^t} \right); \text{ donde:}$$

ΔC_{kg} = incremento en el costo (\$ / kg)

ΔY_{kg} = la masa extraída que causó el incremento del precio (kg)

$P_{kg,t}$ = la cantidad producida anualmente del recurso en el año t (kg / año)

d = la tasa de descuento

T = periodo considerado (años)

Cabe mencionar que el Daño también puede ser expresado en términos de valores económicos en vez de valores de masa, como se muestra a continuación:

$$Daño = \sum_{t=1}^T \left(\frac{\Delta C_s}{\Delta Y_s} \times P_{s,t} \times \Delta Y_s \times \frac{1}{(1+d)^t} \right); \text{ donde:}$$

ΔC_s = incremento en el costo por dolar producido (\$/\$)

ΔY_s = la cantidad extraída en términos monetarios (\$)

P_s = la cantidad producida anualmente expresada en términos monetarios (\$/ año)

d = la tasa de descuento

T = periodo considerado (años)

Dentro de la metodología ReCiPe, después de calcular los valores correspondientes al daño, se procede a seguir una serie de pasos para la obtención de un factor de caracterización que pueda ser expresado en términos de kg de hierro (Fe) equivalentes. A continuación se presenta el resumen de los pasos que se siguen:

- a) Debido a que de una mina se extraen diversos materiales, se procede a ponderar sus valores en el mercado conforme a las proporciones que se extraen de la mina, para poder asignar un valor al yacimiento.
- b) Se hace el cálculo para cada decremento en el grado de la mina, lo cual llevará a una extracción de una cantidad mayor de material para mantener las ganancias.
- c) Se hace el cálculo del incremento del costo marginal en el nivel del depósito.
- d) Se hace el cálculo del incremento del costo en el nivel del commodity
- e) Se obtiene el factor de caracterización por kg a partir del incremento del costo marginal por dólar.

Finalmente el factor de caracterización se convierte a kg de Fe equivalentes.

Agotamiento de combustibles fósiles

En esta categoría, el término de combustibles fósiles hace referencia al grupo de recursos que contienen hidrocarburos. En este caso, como no es posible asignar un grado a los hidrocarburos, el término que se utiliza para determinar la calidad del petróleo crudo es la gravedad (peso) (Goedkoop et al. 2013).

En vista de que los costos de extracción de los hidrocarburos varían en función de la localización del yacimiento y sus características particulares, la metodología ReCiPe trabaja con un “mix” que permite tener un valor que incluye tanto fuentes convencionales como no convencionales del recurso, tales como yacimientos en aguas profundas, yacimientos en suelos oceánicos y regiones árticas, además de petróleo obtenido a partir de arenas o en depósitos de lutitas (Goedkoop et al. 2013). Además, también considera la disponibilidad del recurso y aspectos económicos del mercado.

Con base en esto se desarrolló un factor de caracterización de punto medio para el agotamiento de los combustibles fósiles de acuerdo con lo siguiente:

$$CF_{midpoint,i} = \frac{CED_i}{CED_{ref}} ; \text{ donde:}$$

$CF_{midpoint,i}$ = factor de caracterización de punto medio para el recurso no renovable i
(en kg de petróleo-equivalentes/unidad de recurso i)

CED_i = indicador de la demanda energética acumulada del recurso no renovable i
(en MJ/unidad del recurso i)

CED_{ref} = indicador de la demanda energética acumulada del recurso petróleo de referencia (en MJ/kg de petróleo)

2.8 Antecedentes: Estudios de ACV en sistemas de agua urbanos

Debido a que el proceso que integra la sucesión de actividades necesarias para proveer el servicio hídrico y los servicios de saneamiento implican un consumo de energía considerable, emisión de gases de efecto invernadero (Nair *et al.* 2014) y diversos impactos al ambiente, es de gran importancia contar con información fidedigna al respecto, a fin de poder identificar las áreas de oportunidad para reducir y/o mitigar, de una manera integral, las afectaciones debidas a este proceso, mediante el análisis de ciclo de vida de los sistemas de agua, que incluyan desde su captación hasta su destino.

El enfoque de ACV ha sido utilizado por diversos autores para investigar los impactos asociados a la construcción y operación de sistemas de agua urbanos o de sus componentes. Incluso, Nair *et al.* (2014) reportan que el ACV es una metodología ampliamente utilizada para investigar impactos ambientales de operaciones de los sistemas de agua y su infraestructura. Dentro de los trabajos realizados recientemente sobre el tema, destacan los de Jeong *et al.* (2015), en Estados Unidos; Friedrich *et al.* (2009a), en Sudáfrica; de Haas *et al.* (2011) y Lane *et al.* (2015), en Australia. Asimismo, en España se han realizado investigaciones relevantes sobre este tema, entre las que se pueden mencionar las realizadas por Alfonsin *et al.* (2014), Alfonsin *et al.* (2015), Amores *et al.* (2013), Angrill *et al.* (2012), Morales-Pinzón *et al.* (2011), Pasqualino *et al.* (2009), Pasqualino *et al.* (2011), Petit-Boix *et al.* (2014), Petit-Boix *et al.* (2015) y Sanjuan-Delmás *et al.* (2014).

El trabajo de de Haas *et al.* (2011), analiza el sistema de agua urbano en la Costa Dorada (Gold Coast) en Australia, tomando en consideración el bombeo de agua, su potabilización, la distribución del agua en la red, la recolección de aguas residuales y el tratamiento de las mismas. Asimismo, incluye operaciones características de la región como es el proceso de desalinización de agua y el uso de tanques para la colecta de agua de lluvia. En este estudio se llegó a la conclusión, después de realizar el ACV, que las operaciones de tratamiento de aguas eran la mayor fuente de los impactos considerados. Además, destaca el hecho de que existen diferencias significativas en el consumo de energía correspondiente a diferentes fuentes de suministro de agua.

Por otra parte, el trabajo de Friedrich et al. (2009a), realizado en condiciones muy diferentes al de de Haas et al (2011), realiza un ACV para el sistema de agua urbana de la localidad de eTekwini (Durban) en Sudáfrica. En este trabajo se incluyen las etapas de tratamiento de agua no potable, distribución de agua potable, recolección de aguas residuales, tratamiento de aguas residuales y reciclaje de aguas residuales. Algunos de sus resultados más relevantes indican que el tratamiento de aguas residuales por el proceso de lodos activados es la etapa que presenta un mayor consumo de energía. Además, indica que la distribución de agua potable es la etapa que registra una mayor aportación porcentual a los impactos estudiados, ya que constituye más del 30%.

Con respecto al trabajo de Jeong et al. (2015), realizado en la Ciudad de Atlanta, Georgia, en los Estados Unidos de América, se realiza el ACV del sistema de agua centralizado de la ciudad, considerando las siguientes etapas: suministro, recolección de aguas residuales, recolección de aguas pluviales, así como la construcción y el desmantelamiento de la infraestructura. En este estudio, los resultados más relevantes indican que la construcción de infraestructura y el consumo de energía eléctrica son los procesos que contribuyen de manera preponderante a los impactos ambientales estudiados. Asimismo, se obtuvo que los efectos carcinogénicos, la ecotoxicidad, los efectos no carcinogénicos y la eutrofización fueron los impactos más relevantes para el sistema.

Para el caso de las investigaciones realizadas en España, la temática que abordan es diversa, como veremos a continuación.

Alfonsin et al. (2015) estudian la selección de tecnologías para la remoción de olores en plantas de tratamiento de aguas residuales en dos ciudades. Al analizar dos sistemas biológicos, dos físico/químico y uno combinado, concluyeron que los que provocan menores impactos ambientales son los biológicos, en tanto que el sistema químico (depurador químico) es el que provoca impactos mayores. En el caso de los sistemas biológicos el mayor porcentaje de los impactos fue atribuido al consumo de energía.

Angrill et al. (2012) abordan el problema de la escasez de agua en diversas ciudades del Mediterráneo, mediante el estudio de 8 escenarios de infraestructura distintos para la captación, almacenamiento y distribución de agua de lluvia. En este sentido, se busca evaluar,

mediante un ACV qué tipo de infraestructura es la que genera impactos ambientales menores. Como resultado de este estudio, se concluyó que los dos escenarios con impactos ambientales menores fueron los que corresponden a modelos urbanos tanto difusos como compactos, con tanques distribuidos en el techo para ambos modelos.

También sobre el tema de captación de agua de lluvia, el trabajo de Morales-Pinzón et al. (2011), aunque conceptualizado en España, estudia los sistemas de captación de agua de lluvia en vecindarios emergentes en Colombia, en las áreas de Bogotá y de Pereira. Los resultados indican que los impactos ambientales están asociados, de manera importante con el tipo de infraestructura requerida y por los volúmenes de almacenamiento necesarios.

En contraste con la temática estudiada por Alfonsin et al. (2015), Angrill et al. (2012) y Morales-Pinzón et al. (2011), Petit-Boix et al. (2015) estudian los impactos ambientales resultantes del mantenimiento y operación de las redes de drenaje españolas desde una perspectiva de ciclo de vida. En este estudio se encontró una relación significativa entre los kWh consumidos y la longitud del drenaje y, entre otros factores, tales como la población y el caudal de aguas residuales producido. El estudio también incluye, entre sus conclusiones, el hecho de que las ciudades del Atlántico pueden consumir hasta 5 veces más energía que las regiones Mediterráneas o Subtropicales.

Con respecto al tema de la distribución del agua, Sanjuan-Delmás et al. (2014) realizan una evaluación ambiental de diferentes tuberías para la distribución de agua potable en ciudades pequeñas a medianas, en particular, para el caso de Betanzos, España. El estudio se concentra en el analizar el impacto ambiental de tuberías de dos diámetros (90mm y 200mm) fabricadas con distintos materiales. Sanjuan-Delmás et al. (2014) concluyen que, para el caso de las tuberías de 90mm, los materiales analizados (cloruro de polivinilo, polietileno de alta densidad y polietileno de baja densidad) tienen impactos ambientales similares. En contraste, para el caso de las tuberías de 200mm, el hierro dúctil y el poliéster reforzado con fibra de vidrio presentan impactos ambientales mayores que el polietileno de alta densidad y el cloruro de polivinilo. Con respecto a las distintas fases de construcción, la instalación presenta un porcentaje mayor de impactos ambientales para las tuberías de 90mm de diámetro que para las de 200mm de diámetro.

Finalmente, el trabajo de Amores et al. (2013) estudia el ciclo urbano del agua en condiciones mediterráneas, en particular, el caso de la ciudad de Tarragona, España. El estudio se llevó a cabo considerando seis etapas del ciclo (extracción del agua, tratamiento del agua potable, bombeo intermedio, red de distribución, recolección de aguas residuales y tratamiento de aguas residuales). Asimismo, se analizan tres escenarios, siendo el primero, el escenario base, el segundo, considerando el uso de agua tratada, y el tercero, considerando el uso de plantas desalinizadoras de agua y el uso de agua tratada durante los periodos de sequía. Como parte de los resultados más relevantes, los autores señalan que en el primer escenario, el mayor porcentaje de los impactos proviene de la red de distribución de aguas, seguido por el bombeo para la recolección de aguas residuales. En el segundo escenario no hay mejoras sustanciales con respecto al primero, ya que la energía que se ahorra al extraer menor cantidad de agua, se consume en el tratamiento terciario del agua. En el caso del escenario tres, todas las categorías de impacto aumentan, debido al uso de plantas desalinizadoras.

En el caso de Latinoamérica, existen pocos estudios enfocados a evaluar los impactos ambientales de los sistemas de gestión hídrica urbanos utilizando la metodología de ACV. Entre ellos destacan los trabajos realizados por Ortíz-Rodríguez et al. (2016) y Hernández-Padilla et al. (2017).

2.9 Análisis de Ciclo de Vida del Sistema de Gestión Hídrica de la Ciudad de México

A diferencia de otras regiones del mundo, en el caso de México, aunque el tema del agua y, en particular el tema del agua en la CDMX, ha sido ampliamente estudiado, el enfoque de ACV no ha sido integrado de forma generalizada para el análisis de los sistemas de agua urbanos. Sin embargo, destaca el trabajo de Noyola et al. (2016) que analiza, en uno de sus apartados, el ACV de diferentes procesos para el tratamiento de aguas residuales para ciudades medianas y pequeñas. Asimismo, el trabajo realizado por el Centro Mario Molina (CMM 2011), aunque no con un enfoque de ACV, aborda el estudio del consumo energético asociado con la operación del sistema de suministro de agua potable en la CDMX. En el

mismo sentido, el trabajo sobre el nexo agua-energía de Valek et al. (2017) aborda la temática de las emisiones asociadas con el suministro de agua a la CDMX .

Sin embargo, cabe mencionar que la realización de estudios bajo el un enfoque de ACV en el país se ha incrementado paulatinamente. En este sentido, Güereca et al. (2014) señalan que la utilización del ACV en el análisis de diversos sistemas ha ido en aumento en el país en los últimos años, tanto en empresas paraestatales como en el sector privado.

En vista de que una de las prioridades a nivel regional y nacional, es un manejo adecuado de los recursos hídricos para utilizarlos en el desarrollo socioeconómico y en la reducción de la pobreza, es necesario un conocimiento adecuado tanto del sistema, como de los impactos que puede conllevar la prestación de los servicios, como es el caso del suministro de agua potable y los servicios de drenaje. Asimismo, es de gran importancia contar con la información adecuada para la toma de decisiones que permitan un manejo sustentable del recurso (CMM 2011, PNH 2014, UNESCO 2012 y UNESCO 2015). Por ello es de gran relevancia la realización de estudios de con un enfoque de ACV que permitan la evaluación integral de los impactos ambientales resultantes de la operación de los sistemas de agua urbana.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Evaluar los impactos ambientales del sistema de gestión hídrica de la Ciudad de México, con un enfoque de análisis de ciclo de vida.

3.2 Objetivos Particulares

- Caracterizar el sistema de gestión hídrica de la Ciudad de México.
- Cuantificar el inventario de ciclo de vida del sistema de gestión hídrica de la Ciudad de México.
- Modelar los impactos ambientales con enfoque de ciclo de vida para las categorías de cambio climático, reducción de la capa de ozono, toxicidad humana, formación de oxidantes fotoquímicos, acidificación terrestre, eutrofización del agua dulce, ecotoxicidad terrestre, agotamiento del agua, agotamiento de metales y agotamiento de combustibles fósiles.
- Identificar la etapa o etapas que presentan el mayor impacto ambiental.

4. Metodología

Para realizar el presente estudio se siguieron los pasos que se presentan en la Figura 4.1 y que se explican a continuación.

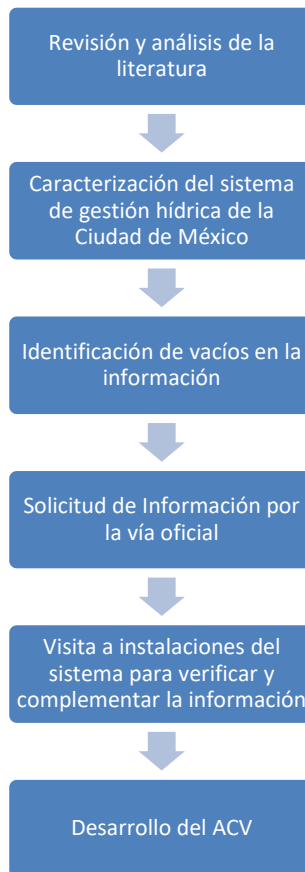


Figura 4.1.- Diagrama de Flujo de las Etapas de la Investigación

Revisión y análisis de la literatura: En esta etapa se recopiló y analizó la información referente al suministro de agua y a la provisión de servicios de saneamiento en la CDMX. En esta fase se revisó la información disponible en el tema publicada por la CONAGUA, el SACM, la SEMARNAT y el Gobierno de la Ciudad de México. Asimismo, se analizaron las publicaciones técnicas, relacionadas con el tema, en particular, las que tratan las etapas de interés para el presente trabajo. También se revisaron tesis de diferentes niveles que abordaran los puntos de interés.

Caracterización del sistema de gestión hídrica de la Ciudad de México: Con base en la información recabada en la etapa previa, se procedió a elaborar una primera caracterización del sistema de gestión hídrica de la Ciudad de México, es decir, se procedió a definir las operaciones más relevantes para cada etapa del análisis, así como las unidades administrativas, en los diferentes niveles de gobierno, responsables de operarlas.

Identificación de vacíos en la información: En esta etapa, con base en la información recabada en las dos etapas precedentes, se definió el tipo de información faltante y la unidad administrativa que podría proporcionar dicha información.

Solicitud de información por la vía oficial: Una vez detectados los vacíos en la información se procedió a dirigir las solicitudes de información correspondientes, en primera instancia, por medio de la Oficina de Información Pública del Gobierno del Distrito Federal. Asimismo, se dirigieron solicitudes de información a los directivos de diferentes áreas del SACM y de la CONAGUA, con el objetivo de obtener información técnica primaria.

La información solicitada versó, principalmente sobre: caudales (suministrados, tratados, potabilizados y bombeados, según sea el caso), consumo de energía, uso de reactivos (potabilización y tratamiento), emisiones debidas al uso de reactores anaerobios (en caso de que existiera información al respecto) y porcentaje de pérdidas físicas estimadas. También se solicitó información sobre puntos de descarga de aguas residuales.

Las unidades administrativas consideradas para la solicitud de la información antes referida, se enlistan a continuación:

CONAGUA	SACM
Dirección General del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México	Dirección
Subdirección General de Administración del Agua	Subdirección de Control de la Calidad del Agua
Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento	Dirección de Agua Potable y Potabilización
	Dirección de Drenaje, Tratamiento y Reúso
	Dirección de Mantenimiento

Visita a instalaciones del sistema para verificar y complementar la información: Con base en la información contenida en las respuestas, o a falta de ellas, se analizó el tipo de información faltante y las instalaciones en las que, dialogando con el personal técnico responsable, se podría tener la información requerida. De acuerdo con eso, se solicitó autorización a las unidades administrativas pertinentes del SACM y de la CONAGUA para visitar un total de 11 instalaciones de acuerdo con lo que se presenta en el ANEXO II.

La información recabada durante dichas visitas, así como la interacción con el personal técnico y operativo de las instalaciones referidas, permitió validar la información obtenida en otras fuentes, así como definir con precisión la información faltante en el inventario.

Cuando no se contaba información sobre alguna de las operaciones mencionadas, se utilizó información proveniente de literatura especializada y/o publicaciones científicas arbitradas.

Desarrollo del ACV: El análisis se realizó siguiendo los lineamientos de la norma ISO 14040 (2006) (Gestión Ambiental-Evaluación del Ciclo de Vida). Asimismo, se empleó la base de datos Ecoinvent 3.01¹⁰, el Software SimaPro 8.5.2.0 (PréConsultants) y el método ReCipe V. 1.12 (Goedkoop et al. 2013).

¹⁰ Ecoinvent es una base de datos Suiza que provee información documentada para miles de productos, con la finalidad de evaluar sus impactos ambientales. Disponible en: <http://www.ecoinvent.org/>

4.1 Definición de Objetivos y Alcance

Objetivo de ACV del sistema de gestión hídrica de la Ciudad de México

Evaluar los impactos ambientales del sistema de gestión hídrica de la Ciudad de México, con un enfoque de análisis de ciclo de vida, con la finalidad de identificar la etapa o etapas que presentan el mayor impacto ambiental y hacer recomendaciones de mejora.

Función del Sistema

Proveer servicios de suministro de agua y saneamiento a los habitantes de la Ciudad de México mediante la operación de infraestructura correspondiente

Alcance

Límites del sistema

Para el ACV se consideran las etapas de captación, transporte, potabilización, distribución, uso, recolección, tratamiento, reúso y vertido en el cuerpo receptor, es decir, desde la extracción de agua de fuentes subterráneas o la captación en fuentes superficiales (bombeo), pasando por el proceso de transporte (bombeo) , el proceso de potabilización (procesos físicos y químicos), la distribución en la red de agua potable (bombeo), el uso (bombeo en el interior del sitio en el que se usa), la recolección (bombeo y adición de sustancias químicas), el tratamiento (proceso físicos, químicos y biológicos para el tratamiento de aguas residuales municipales), el reúso (bombeo) y el vertido en el cuerpo receptor (bombeo) (Figura 4.2).

Para el ACV del sistema de gestión hídrica de la CDMX se consideraron los siguientes elementos:

- Energía eléctrica utilizada en las operaciones de bombeo y en las operaciones relativas a la potabilización y tratamiento.

- Reactivos utilizados en los procesos de potabilización, distribución, recolección, tratamiento y vertido en el cuerpo receptor.
- Disposición de los residuos.
- No se incluye la construcción, el mantenimiento ni el desmantelamiento de la infraestructura una vez finalizada su vida útil.

Límites espaciales o geográficos: El presente estudio se limita al territorio comprendido por la CDMX, es decir, se evalúan las etapas y operaciones necesarias para brindar los servicios de suministro de agua potable y saneamiento a los habitantes de la Ciudad. Debido a la situación particular del sistema de gestión hídrica de la Ciudad de México, se incluyen las fuentes de abastecimiento de agua tanto locales como externas al territorio de la CDMX, pero que son utilizadas para suministro. En el mismo sentido, se consideran los impactos de las aguas residuales vertidas en territorios distintos al de la CDMX, pero que son parte de las descargas de la misma.

Límite temporal: El año de referencia para la elaboración del ACV es 2015, en virtud de que para este año se cuenta con información de buena calidad.

Límites tecnológicos: Los procesos utilizados son representativos de la tecnología actual existente en México para el suministro de agua y la provisión de los servicios de saneamiento.

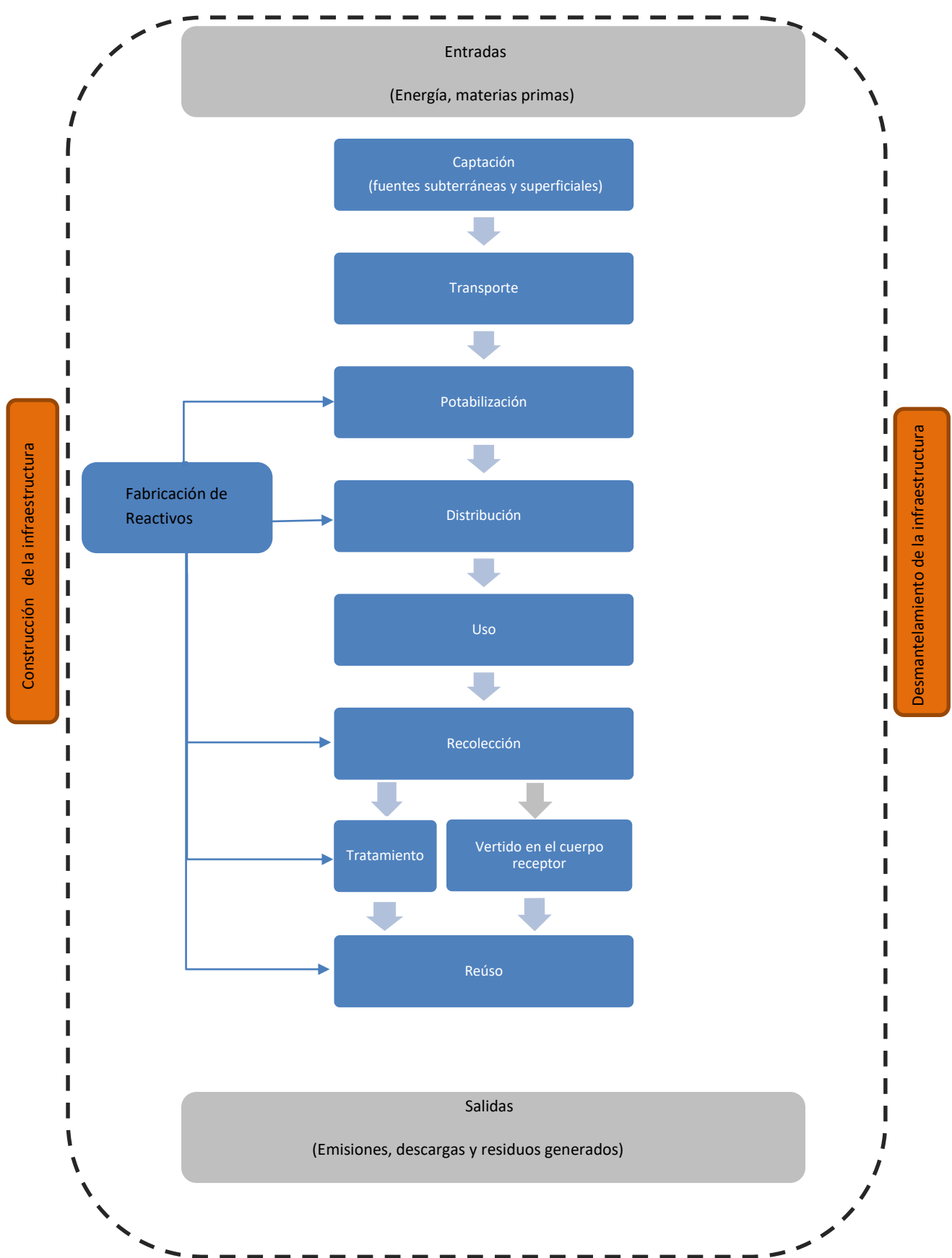


Figura 4.2.- Límites del Sistema para el ACV del Sistema de Gestión Hídrica de la Ciudad de México

Unidad Funcional

Con respecto a la unidad funcional, considerando que la función principal del sistema es el abastecimiento de agua de uso urbano a la CDMX, así como su potabilización, recolección, tratamiento y desalojo, se utilizará 1m³ de agua disponible para realizar el ACV. En este sentido, cabe mencionar que, trabajos sobre el ACV del agua urbana, como los realizados por Jeong *et al.* (2015), Lassaux *et al.* (2001) y Mohamed Mahgoub *et al.* (2010), utilizan la misma unidad funcional.

4.2 Descripción del Sistema

Para el estudio de ACV del sistema de gestión hídrica de la CDMX se analizarán nueve etapas de acuerdo con lo que se presenta en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1.- Etapas y Procesos que Integran el ACV del Sistema de Gestión Hídrica de la Ciudad de México

Etapas	Proceso(s)
Captación	Bombeo/Operación de compuertas/Remoción de olores
Transporte	Bombeo
Potabilización	Filtración directa/Clarificación convencional/Ósmosis inversa
Distribución	Bombeo/Cloración
Uso	Bombeo
Recolección	Bombeo y adición de reactivos
Tratamiento	Tratamiento por lodos activados
Reúso	Bombeo
Vertido en el cuerpo receptor	Bombeo y adición de reactivos

4.3 Metodología para la evaluación de impacto

Para la evaluación de impacto del Ciclo de Vida se utilizó el método ReCiPe versión 1.12. Este método tiene un enfoque cuantitativo en la evaluación del impacto, de manera que se basa en el uso de factores de caracterización, a partir de los cuales se construyen indicadores para, finalmente, obtener un valor numérico para la o las categorías de impacto bajo estudio (Goedkoop et al., 2013). De acuerdo con esto, los valores de emisiones o descargas que se obtienen al construir el inventario, son convertidos en valores equivalentes mediante el uso de factores de caracterización específicos para cada categoría de impacto. Posteriormente, los valores obtenidos mediante el uso de factores de caracterización se utilizan para obtener un valor global para la categoría de impacto de interés mediante el uso de un indicador. De esta manera, se obtiene un valor numérico para dicha categoría de impacto.

Cabe mencionar que para la obtención de factores de caracterización se requieren modelos de caracterización, cuyo uso tiene una incertidumbre asociada, la cual puede tener tres diferentes perspectivas de acuerdo con lo siguiente:

Individualista (I): Perspectiva a corto plazo; da mayor importancia a las generaciones actuales que a las futuras (horizonte de 20 años).

Jerárquica (H): Hace una evaluación cuidadosa entre impactos presentes y futuros y considera la posibilidad de que existan impactos aún no probados (horizonte de 100 años).

Igualitaria (E): Perspectiva a largo plazo. Da el mismo valor a las generaciones presentes y a las futuras. (horizonte de 500 años). Es la perspectiva más conservadora, sin embargo, debido al horizonte temporal que se considera es también la perspectiva con mayor incertidumbre.

De acuerdo con Goedkoop et al. (2013), las categorías de impacto deben reflejar aspectos de relevancia ambiental directa. Además, señalan que las categorías de impacto seleccionadas deben ser de interés tanto internacional como regional, es decir, deben ser relevantes para el área en la que se realiza el estudio.

Cabe mencionar que, además, la metodología considera dos grupos de categorías de impacto: las de punto medio y las de punto final. Las de punto medio son la liga en la cadena causa-efecto de una categoría de impacto. Son definidas en el lugar donde los mecanismos comunes a una variedad de sustancias se llevan a cabo (Goedkoop et al. 2013). Un ejemplo de este tipo de categorías de impacto es la acidificación.

La expresión para calcular la caracterización a nivel del punto medio es la siguiente:

$$I_m = \sum_i Q_{mi} m_i ; \text{ donde:}$$

I_m = resultado del indicador de punto medio para la categoría de impacto m

m_i = magnitud de la intervención i (p.ej. la masa de CO₂ liberada al aire)

Q_{mi} = factor de caracterización que conecta la intervención i con la categoría de impacto de punto medio m

Con respecto a las categorías de impacto de punto final, se trata de las que se encuentran en el extremo o final de un mecanismo ambiental, como el daño a los ecosistemas o las afectaciones a la salud humana (Goedkoop et al. 2013). En este caso hay dos enfoques para el cálculo de la caracterización a nivel del punto final. El primer enfoque se presenta a continuación:

$$I_e = \sum_i Q_{ei} m_i ; \text{ donde:}$$

I_e = resultado del indicador para la categoría de impacto de punto final e

m_i = magnitud de la intervención i (p.ej. la masa de CO₂ liberada al aire)

Q_{ei} = Factor de caracterización que conecta la intervención i con la categoría de impacto de punto final e

El segundo enfoque inicia a partir de los puntos medios. La expresión para su cálculo es la siguiente:

$$I_e = \sum_m Q_{em} I_m ; \text{ donde:}$$

I_m = resultado del indicador para la categoría de impacto de punto medio m

Q_{em} = Factor de caracterización que conecta la categoría de impacto de punto medio m con la categoría de punto final e

I_e = resultado del indicador para la categoría de impacto de punto final e

$$I_e = \sum_m Q_{em} I_m ; \text{ donde:}$$

I_m = resultado del indicador para la categoría de impacto de punto medio m

m_m = magnitud de la intervención i (p.ej. la masa de CO_2 liberada al aire)

Q_{em} = Factor de caracterización que conecta la categoría de impacto de punto medio m con la categoría de punto final e

I_e = resultado del indicador para la categoría de impacto de punto final e

Considerando lo antes expuesto, para realizar la evaluación del impacto se seleccionaron las categorías correspondientes con base en la literatura especializada en el tema, en la que, como ya se mencionó en los antecedentes, corresponde a estudios realizados en sistemas de suministro agua de diversas ciudades del mundo. En la Tabla 4.2 se presentan las categorías de impacto analizadas, las cuales se explican con mayor detalle en el siguiente apartado.

Tabla 4.2.- Categorías de Impacto a Analizar (ReCiPe v 1.12)

Categoría de Impacto	Unidades	Factor de Caracterización
Cambio climático	kg (CO ₂ liberados al aire)	Potencial de calentamiento global
Reducción de la capa de ozono	kg (CFC-11 liberados al aire)	Potencial de reducción de la capa de ozono
Toxicidad humana	kg (1,4-DB liberados al aire)	Potencial de toxicidad humana
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg (COVNM liberados al aire)	Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos
Acidificación terrestre	kg (SO ₂ liberados al aire)	Potencial de acidificación terrestre
Eutrofización del agua dulce	kg (P vertidos en el agua dulce)	Potencial de eutrofización de agua dulce
Ecotoxicidad terrestre	kg (1,4- DB liberados al suelo industrial)	Potencial de ecotoxicidad terrestre
Agotamiento del agua	m ³ (agua)	Potencial de agotamiento del agua
Agotamiento de metales	kg (Fe)	Potencial de agotamiento de metales
Agotamiento de combustibles fósiles	kg (petróleo crudo)	Potencial de agotamiento de combustibles fósiles

CFC-11 = Clorofluorocarbono

1,4-DB = 1,4 Diclorobenceno

COVNM = Compuestos Orgánicos Volátiles, excluyendo al metano.

Fuente: Elaboración propia con base en Goedkoop, et al. 2013.

En virtud de que el sistema de gestión hídrica de la CDMX, como cualquier sistema de este tipo, registra pérdidas físicas en la etapa de distribución, las cuales se ha estimado, se encuentran entre el 35 y 40% de acuerdo con lo reportado por Arreguín et al. (1997), Breña Puyol y Breña Naranjo (2009), de la Peña et al. (2013) y SACM (2012), se considerará un valor de 40% de pérdidas físicas para el análisis. Lo anterior, se realizó siguiendo la

metodología propuesta por Friedrich et al. (2009a, 2009b) y Klinglmair et al. (2014), la cual, con base en la Tabla 4.3, considera que es necesario captar, transportar, potabilizar y distribuir 1.67m^3 de agua en cada una de estas etapas para que el usuario pueda acceder a 1m^3 de agua.

Tabla 4.3.- Pérdidas Físicas en el Sistema de Gestión Hídrica de la Ciudad de México

ETAPA	CANTIDAD	PÉRDIDA
Captación	1.67 m^3	0m^3
Transporte	1.67 m^3	0m^3
Potabilización	1.67 m^3	0m^3
Distribución	1.67 m^3	0.67m^3 (40%)
Uso	1.0 m^3	0m^3
Recolección	1.0 m^3	0m^3
Tratamiento	0.08 m^3	0m^3
Vertido en el Cuerpo Receptor ¹	0.92 m^3	0m^3
Reúso ²	1.0 m^3	0m^3

¹ Es el 92% del agua no tratada que corresponde al riego agrícola en el en el Valle del Mezquital.

²Corresponde al 0.08m^3 del agua tratada (0.04m^3 son utilizados para riego agrícola en la delegación Tláhuac y para riego de parques y jardines en la CDMX y 0.04m^3 son destinados al mantenimiento del sistema lacustre de Xochimilco)

Finalmente, para obtener las categorías de impacto referidas en la Tabla 4.2, se realizó el análisis incluyendo las 10 etapas estudiadas, considerando pérdidas físicas del 40% como se mencionó anteriormente. Para esto se utilizó un modelo de caracterización de punto medio jerárquico (Midpoint (H)).

5. Análisis (Integración) del Inventario

Como se mencionó anteriormente, se solicitó información por la vía oficial al SACM y a la CONAGUA. Además, dicha información fue complementada con la información proveniente de artículos arbitrados, tesis de licenciatura, maestría y doctorado y manuales técnicos de operación. Asimismo, se incluyó información que provino de comunicaciones directas, durante las visitas, con el personal técnico y operativo de las instalaciones en cuestión.

Consumo energético por etapa

Con base en la información obtenida se calculó el consumo de energía eléctrica para cada una de las etapas (Ver ANEXO III), el cual se presenta en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1.- Consumo de Energía Eléctrica del Sistema de Gestión Hídrica de la Ciudad de México

ETAPA	CONSUMO ENERGÉTICO (kWh/m³)¹¹	CONSUMO ENERGÉTICO POR ETAPA (%)
Captación	0.638 ^a / 0.088 ^b	8.41 / 1.16
Transporte	5.403 ^c	71.21
Potabilización	0.230	3.03
Distribución	0.036	0.47
Uso	0.077	1.01
Recolección	0.133	1.75
Tratamiento	0.813	10.72
Reúso	0.036	0.47
Vertido en el cuerpo receptor	0.133	1.75
Total	7.587	100

^aAguas subterráneas, ^bAguas superficiales, ^c4.865kWh/m³ corresponden al Sistema Cutzamala y 0.538 para el transporte de agua de otras fuentes.

¹¹ En el ANEXO III se indican las fuentes de información con base en las cuales se calculó el consumo energético para cada etapa.

Etapa: Captación

En esta etapa se incluye información relativa a la captación de agua, la cual consiste en la captación del recurso a partir de fuentes superficiales y subterráneas.

Con respecto a la captación de agua subterránea se incluye el consumo de energía eléctrica relativo a la extracción en los pozos operados por el SACM, es decir, los pozos de las baterías que operan en el Sistema Lerma, los pozos del sistema PAI y los pozos que se encuentran en territorio de la CDMX.

Con respecto a las fuentes superficiales, la información incluye la energía requerida para la captación de agua de ríos y manantiales dentro de la CDMX.

Con respecto a la captación de las aguas provenientes del Sistema Cutzamala, se consideran como parte de la etapa de captación, el consumo de energía resultante de la operación de las compuertas y servicios menores de las presas.

En la Tabla 5.2 se presenta la información antes mencionada, además de los módulos de Ecoinvent 3.01 utilizados para la modelación.

Tabla 5.2.- Inventario para la Etapa de Captación

Consumo de energía UF		Módulo de Ecoinvent 3.01
0.354 kWh ¹		Electricity, high voltaje {MX} production mix
0.003 kWh ²		Electricity, high voltaje {MX} production mix
Reactivos		Módulo de Ecoinvent 3.01
Reactivo	Cantidad UF	
Carbón activado ^{3,4}	4.5g ⁵	Charcoal {GLO} ,market for ⁵
Recursos		Módulo de Ecoinvent 3.01
Recurso	Cantidad UF	
Agua subterránea	550kg	Water, groundwater consumption
Agua superficial	450kg	Water, Surface water consumption

¹Corresponde al 55% de la energía requerida para la captación de aguas subterráneas.

²Corresponde al 45% de la energía necesaria para la captación de aguas superficiales.

³Aunque la adición de carbón activado corresponde a un proceso de tratamiento, se considera en esta etapa, ya que este reactivo se aplica en el punto de captación.

⁴Se usa carbón (charcoal) como proxy del carbón activado, de acuerdo con Schakel et al. (2014).

⁵ Valor calculado con base en la información proporcionada por el ORGANISMO DE CUENCA AGUAS DEL VALLE DE MEXICO-RESIDENCIA GENERAL DE OPERACIÓN DEL SISTEMA CUTZAMALA durante la visita a las instalaciones el 16 de febrero de 2017.

Etapa: Transporte

En esta etapa se incluye la información que corresponde a las operaciones de bombeo del agua una vez finalizada la captación. El transporte, en este caso, se da entre los puntos de captación y las plantas de potabilización o bien, entre las plantas de potabilización y los puntos de entrega (Tabla 5.3). Cabe mencionar que el caudal de agua proveniente del Sistema Cutzamala, es decir, el porcentaje del metro cúbico correspondiente en la unidad funcional, es el que se considera que llega a tratamiento a los Berros. El porcentaje restante que corresponde a pozos y al Lerma no se considera que pase por una potabilizadora.

En esta etapa también se incluye el uso de reactivos para la desinfección del agua, ya que durante esta etapa también se efectúa dicho proceso.

Tabla 5.3.- Inventario para la Etapa de Transporte

Consumo de energía UF		Módulo de Ecoinvent 3.01
2.091kWh ¹		Electricity, high voltaje {MX} production mix
0.306 kWh ²		Electricity, high voltaje {MX} production mix
Reactivos		Módulo de Ecoinvent 3.01
Reactivo	Cantidad UF	
Hipoclorito de Sodio ³	3.704 g ⁴	Sodium hypochlorite, without water, in15% solution state {GLO} market for
Cloro (gas) ⁵	3.080g ⁶	Chlorine, gaseous {RoW} sodium chloride electrolysis

¹Corresponde al 43% del consumo en kWh del Sistema Cutzamala, ya que de cada metro cúbico de agua que se consume en la CDMX, el 43% proviene del Sistema Cutzamala.

² Corresponde al 57% del consumo en kWh de agua de fuentes distintas al Sistema Cutzamala, ya que de cada metro cúbico de agua que se consume en la CDMX, el 57% proviene de otras fuentes.

³ Aunque la adición de hipoclorito de sodio corresponde a un proceso de potabilización, se considera en esta etapa, ya que este reactivo se aplica en la etapa de transporte.

⁴Valor calculado con base en la información proporcionada por la Dirección Ejecutiva de Operación del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, como respuesta a la solicitud de información realizada el 10 de noviembre de 2016.

⁵Aunque la adición de Cloro (gas) corresponde a un proceso de potabilización, se considera en esta etapa, ya que este reactivo se aplica en la etapa de transporte.

⁶ Valor calculado con base en la información proporcionada por el ORGANISMO DE CUENCA AGUAS DEL VALLE DE MEXICO-RESIDENCIA GENERAL DE OPERACIÓN DEL SISTEMA CUTZAMALA durante la visita a las instalaciones el 16 de febrero de 2017.

Etapa: Potabilización

En esta etapa se incluye información sobre los procesos necesarios para que el agua, tenga la calidad requerida para ser consumida por seres humanos, de acuerdo con los parámetros establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 (Tabla 5.4).

Tabla 5.4.- Inventario para la Etapa de Potabilización

Consumo de energía UF		Módulo de Ecoinvent 3.01
0.230 kWh		Electricity, high voltaje {MX} production mix
Reactivos		Módulo de Ecoinvent 3.01
Reactivo	Cantidad UF ¹	
Cal química	5.5mg	Lime {GLO} market for
Hipoclorito de Sodio	3.704g	Sodium hypochlorite, without water, in15% solution state {GLO} market for
Peróxido de Hidrógeno	5.3mg	Hydrogen peroxide, without water, in 15% solution state {GLO} market for
Ácido Fosfórico	7.4mg	Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state {GLO} market for
Cloro líquido	2.575g	Chlorine, liquid {GLO} market for
Sulfato de Aluminio	5.5mg	Aluminium sulfate, poder {GLO} market for
Cloro (gas)	3.08g	Chlorine, gaseous {RoW} market for
Emisiones al Agua (retrolavados)		Módulo de Ecoinvent 3.01
Compuesto	Cantidad UF ²	
DBO5	180mg	BOD5, Biological Oxygen Demand
DQO	1.2g	COD, Chemical Oxygen Demand
Compuestos de aluminio	1.65g	Aluminium compounds, unespecified
Compuestos de Manganeseo	525mg	Manganese compounds
Agua	0.03 m ³	Water, MX
Emisiones al suelo (lodo)		Módulo de Ecoinvent 3.01
Compuesto	Cantidad UF ³	

Aluminio	7.11mg	Aluminium
Compuestos de Manganeso	1.806g	Manganese compounds
Hierro	4.83g	Iron
Carbón orgánico	4.0185g	Organic carbón
Compuestos de arsénico	23.1mg	Arsenic compounds
Calcio	495mg	Calcium
Hierro	376.5mg	Iron
Magnesio	191.7mg	Magnesium
Compuestos de plomo	4.8mg	Lead compounds
Potasio	117.9mg	Potassium
Sodio	306mg	Sodium

¹Valores calculados con base en la información proporcionada por la Dirección Ejecutiva de Operación del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, como respuesta a la solicitud de información realizada el 10 de noviembre de 2016.

²Valores calculados con base en la calidad del agua de retrolavado reportada por la CNA (2007).³Valores calculados con base en las características de los lodos producidos por plantas potabilizadoras reportadas por la CNA (2007).

Etapa: Distribución

En esta etapa se incluye información sobre el consumo energético de las operaciones de bombeo y desinfección que se llevan a cabo durante la distribución del agua, en la red secundaria, una vez que ha sido potabilizada (Tabla 5.5).

Tabla 5.5.- Inventario para la Etapa de Distribución

Consumo de energía UF		Módulo de Ecoinvent 3.01
0.036 kWh		Electricity, high voltaje {MX} production mix
Reactivos		Módulo de Ecoinvent 3.01
Reactivo	Cantidad UF	
Hipoclorito de Sodio	3.704 g ¹	Sodium hypochlorite, without water, in15% solution state {GLO} market for
Cloro (gas)	3.08 g ²	Chlorine, gaseous {RoW} market for

¹Valor calculado con base en la información proporcionada por la Dirección Ejecutiva de Operación del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, como respuesta a la solicitud de información realizada el 10 de noviembre de 2016.

²Valor calculado con base en la información proporcionada por el ORGANISMO DE CUENCA AGUAS DEL VALLE DE MEXICO-RESIDENCIA GENERAL DE OPERACIÓN DEL SISTEMA CUTZAMALA durante la visita a las instalaciones el 16 de febrero de 2017.

Etapa: Uso

En esta etapa se incluye información relativa al consumo energético de las operaciones de bombeo a nivel doméstico (Tabla 5.6). En este caso se toma en cuenta el uso de una bomba eléctrica, de uso doméstico, con una potencia de ¼ hp, considerando que debe bombear el agua a una altura de 3 niveles en 0.41 horas (24.6 minutos).

Tabla 5.6.- Inventario para la Etapa de Uso

Consumo de energía UF	Módulo de Ecoinvent 3.01
0.018 kWh ¹	Electricity grid mix, AC, consumption mix, at consumer, 220V IS S

¹Corresponde al 23.45% debido a que solamente este porcentaje de hogares cuenta con una bomba.

Etapa: Recolección

En esta etapa se incluye información sobre el consumo de energía eléctrica de las operaciones de bombeo de aguas residuales, así como la adición de reactivos que se lleva a cabo durante la recolección de aguas residuales en la red de drenaje (Tabla 5.7).

Tabla 5.7.- Inventario para la Etapa de Recolección

Consumo de energía UF		Módulo de Ecoinvent 3.01
0.119 kWh ¹		Electricity, high voltaje {MX} production mix
0.009kWh ²		Energy, from diesel burned in machinery /RER Energy
Reactivos		Módulo de Ecoinvent 3.01
Reactivo	Cantidad UF	
Lauril sulfato de sodio ³	55.55 mg ⁴	Sodium lauryl sulfate
Emisiones al aire		Módulo de Ecoinvent 3.01
Compuesto	Cantidad UF	
Metano	8.64 g ⁵	Methane

¹ Corresponde al 90% del consumo de esta etapa, ya que el 10% restante se bombea con equipo que consume diesel.

^{2,4,5} En el ANEXO IV se presentan los cálculos para obtener estos valores.

³ En esta etapa se agrega regularmente el producto con marca comercial Bioxiclean®, el cual es un bio oxidante orgánico. El único componente que se muestra en la etiqueta es el lauril sulfato de sodio, por ello se toma en cuenta.

Etapa: Tratamiento

En esta etapa se incluye información relativa al proceso de tratamiento de aguas residuales de tipo doméstico provenientes de la red de drenaje (Tabla 5.8). Se considera, únicamente, la tecnología de lodos activados, en vista de que es la predominante para el tratamiento de aguas residuales en la CDMX. Cabe mencionar que no se consideró el caudal que trata la PTAR de Atotonilco, ya que en el año de referencia utilizado para recabar la información (2015) aún no se encontraba en operaciones dicha PTAR.

Tabla 5.8.- Inventario para la Etapa de Tratamiento

Consumo de energía UF		Módulo de Ecoinvent 3.01
0.065 kWh ¹		Electricity, high voltaje {MX} production mix
Reactivos		Módulo de Ecoinvent 3.01
Reactivo	Cantidad UF ²	
Lauril sulfato de sodio ³	4.444 mg	Sodium lauryl sulfate
Hipoclorito de Sodio	0.296 g	Sodium hypochlorite, without water, in15% solution state {GLO} market for
Cloro (gas)	0.243 g	Chlorine, gaseous {RoW} market for
Emisiones al suelo		Módulo de Ecoinvent 3.01
Compuesto	Cantidad UF ⁴	
Arsénico	0.013mg	Arsenic
Cadmio	0.017mg	Cadmium
Cromo	1.717mg	Chromium
Cobre	1.464mg	Copper
Plomo	0.021mg	Lead
Mercurio	0.292mg	Mercury
Zinc	10.824mg	Zinc
Niquel	2.798mg	Nickel
Emisiones al aire		Módulo de Ecoinvent 3.01
Compuesto	Cantidad UF ⁵	
Metano	691.2 mg	Methane

¹Corresponde al 8% del consumo de esta etapa, ya que solamente el 8% del agua residual en la CDMX recibe tratamiento.

^{2,5}En el ANEXO V se presentan los cálculos para obtener estos valores.

³En esta etapa se agrega regularmente el producto con marca comercial Bioxiclean®, el cual es un bio oxidante orgánico. El único componente que se muestra en la etiqueta es el lauril sulfato de sodio, por ello se toma en cuenta.

⁴Valores calculados con base en la información de la NOM-001-SEMARNAT-1996, reducidos en un 10%, considerando que solamente la mitad del agua tratada (4% del total) se destina a lagos en la CDMX.

Etapa: Reúso

Con respecto al reúso, se incluye información sobre el consumo energético de las operaciones de bombeo durante la distribución hacia los puntos de entrega para reúso del agua (Tabla 5.9). Además se incluye la información correspondiente a las descargas de agua en el suelo tanto de aguas tratadas que corresponden a las actividades agrícolas en la CDMX y a las no tratadas que corresponden al riego agrícola en el en el Valle del Mezquital. Asimismo, se incluye información sobre el agua tratada que es vertida en el sistema lacustre de Xochimilco y en lagos para usos recreativos.

Tabla 5.9.- Inventario para la Etapa de Reúso

Consumo de energía UF		Módulo de Ecoinvent 3.01
0.0028 kWh ¹		Electricity, high voltaje {MX} production mix
Emisiones al agua (agua tratada)		Módulo de Ecoinvent 3.01
Compuesto	Cantidad UF²	
Agua	0.04 m ³³	Water, MX
Aceites	0.054g	Oils, unspecified
Sólidos suspendidos	1.08g	Suspenden solids, unspecified
DBO5	1.08g	BOD5, Biological Oxygen Demand
Nitrógeno	1.44g	Nitrogen, total
Fósforo	0.0072g	Phosphorus, total
Arsénico	0.0036g	Arsenic
Cádmio	0.0036g	Cadmium
Compuestos de cianuro	0.036g	Cyanide compounds
Cobre	0.144g	Copper
Cromo	0.018g	Chromium
Mercurio	0.00018g	Mercury
Niquel	0.072g	Nickel
Plomo	0.0072g	Lead
Zinc	0.36g	Zinc
Emisiones al suelo (Agua tratada)		Módulo de Ecoinvent 3.01
Compuesto	Cantidad UF⁴	
Aceites	0.54g	Oils, unspecified
Arsénico	0.0072g	Arsenic
Cádmio	0.0018g	Cadmium
Compuestos de cianuro	0.072g	Cyanide compounds
Cobre	0.144g	Copper

Cromo	0.018g	Chromium
Mercurio	0.00018g	Mercury
Nikel	0.072g	Nickel
Plomo	0.18g	Lead
Zinc	0.36g	Zinc
Emisiones al suelo (agua no tratada)		Módulo de Ecoinvent 3.01
Compuesto	Cantidad UF⁵	
Lauril sulfato de sodio	51.106mg ⁶	Sodium Lauryl sulphate
Nitratos	0.4324mg	Nitrate compunds
Fósforo	7.36g	Phosphorus, total
Aceites	46g	Oils, unspecified
Hierro	818.8mg	Iron
Manganeso	53.36mg	Manganese
Plomo	57.96mg	Lead
Cadmio	43.24mg	Cadmium
Mercurio	0.92mg	Mercury
Arsénico	2.76mg	Arsenic
Cromo	29.44mg	Chromium
Zinc	166.52mg	Zinc
Cobre	47.84mg	Copper

¹Corresponde al 8% del consumo de esta etapa, ya que corresponde al agua previamente tratada.

²Valores calculados con base en la información de la NOM-001-SEMARNAT-1996, reducidos en un 10%, considerando que solamente la mitad del agua tratada (4% del total) se destina a lagos en la CDMX.

³Se usa el valor de 0.04m³, ya que solamente la mitad del agua tratada es destinada a lagos en la CDMX.

⁴Valores calculados con base en la información de la NOM-001-SEMARNAT-1996, reducidos en un 10%, considerando que solamente la mitad del agua tratada (4% del total) se destina a usos agrícolas en la CDMX.

⁵Valores calculados con base en lo reportado por Hernández Padilla (2016), considerando que el 92% del agua residual (no tratada) es utilizada para riego agrícola.

⁶Corresponde al 92% del valor de 55.5mg/m³ calculado en la etapa de Recolección.

Etapa: Vertido en el cuerpo receptor

En esta etapa se incluye información relativa a las operaciones de bombeo durante la conducción de las aguas residuales al punto de descarga (Tabla 5.10). Además, se consideran los reactivos adicionados al agua durante el proceso y los contaminantes que constituyen la descarga de las mismas. Cabe Mencionar que el 92% del agua se vierte en un cuerpo receptor (río, lago o mar), en tanto que del 8% que se trata, la mitad (el 4%) se usa para mantener la zona lacustre de Xochimilco y el otro 4% es principalmente para usos agrícolas en la zona

de Tláhuac y, en menor medida para abastecer a la industria local, y para riego de parques y jardines de la CDMX.

Tabla 5.10.- Inventario para la Etapa de Vertido en el Cuerpo Receptor

Consumo de energía UF		Módulo de Ecoinvent 3.01
0.122 kWh ¹		Electricity, high voltaje {MX} production mix
Reactivos		Módulo de Ecoinvent 3.01
Reactivo	Cantidad UF	
Lauril sulfato de sodio	51.106 mg ²	Sodium lauryl sulfate
Emisiones al aire		Módulo de Ecoinvent 3.01
Compuesto	Cantidad UF	
Metano	26.496 g ³	Methane
Emisiones al agua		Módulo de Ecoinvent 3.01
Compuesto	Cantidad UF ⁴	
Agua	0.92m ³	Water, MX
DBO5	220.8g	BOD5, Biological Oxygen Demand
DQO	478.4g	COD, Chemical Oxygen Demand
Sólidos suspendidos	202.4g	Suspended solids, unspecified
Carbonato de calcio	317.4g	Calcium carbonate
Óxidos de nitrógeno	564.26mg	Nitrogen oxides
Fósforo	7.36g	Phosphorus, total
Aceites	46g	Oils, unspecified
Hierro	818.8mg	Iron
Manganeso	53.36mg	Manganese
Plomo	57.96mg	Lead
Cadmio	43.24mg	Cadmium
Mercurio	0.92mg	Mercury
Arsénico	2.76mg	Arsenic
Cromo	29.44mg	Chromium
Zinc	166.52mg	Zinc
Cobre	47.84mg	Copper

¹Corresponde al 92% del consumo de esta etapa, ya que es el agua que no fue tratada.

^{2,3}En el ANEXO VI se presentan los cálculos para obtener estos valores.

⁴Valores calculados con base en lo reportado por Hernández Padilla (2016), considerando que el 92% del agua residual (no tratada) es utilizada para riego agrícola.

6. Resultados y Discusión: Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida

En esta sección se analizan los impactos potenciales evaluados para cada categoría de impacto, así como las contribuciones porcentuales de cada etapa del sistema de gestión hídrica de la Ciudad de México.

Los resultados del Análisis de Ciclo de Vida permiten identificar las etapas que presentan una contribución mayor a las categorías de impacto analizadas (Figura 6.1). En este estudio se observó que la etapa que presentó la mayor contribución a los impactos en un mayor número de categorías fue la de transporte, ya que tiene la mayor contribución porcentual a los impactos de las categorías de reducción de la capa de ozono (70.90%), acidificación terrestre (74.03%), formación de oxidantes fotoquímicos (70.39%), agotamiento de metales (68.55%) y agotamiento de combustibles fósiles (74.14%). A la etapa de transporte le sucede la etapa de reúso. Con respecto a la categoría de cambio climático, la etapa de transporte también presenta el valor mayor (57.84%) seguida por la de vertido en el cuerpo receptor (17.76%).(Figura 6.1).

Con respecto al reúso, se tienen los valores con mayor aportación porcentual para las categorías de toxicidad humana (87.11%), ecotoxicidad terrestre (88.13%) y eutrofización del agua dulce (48.30%) (Figura 6.1).

Por otra parte, las etapas que agrupan las menores contribuciones porcentuales a las categorías de impacto son, en primer lugar, el uso y en segundo lugar el reúso.

En el caso del uso, presenta las menores aportaciones porcentuales a las categorías de cambio climático (0.0078%), reducción de la capa de ozono (8.27E-06%), acidificación terrestre (0.00032%), eutrofización del agua dulce (1.36E-07%), toxicidad humana (6.92E-05%), formación de oxidantes fotoquímicos (0.00080%), toxicidad terrestre (3.01E-05%) y agotamiento de combustibles fósiles (0.00043%) (Figura 6.1).

Con respecto al reúso, esta etapa presenta la menor aportación para la categoría de agotamiento de metales (0.047%).

Para la etapa de captación, tenemos que la categoría de impacto que presenta el valor mayor es la de agotamiento del agua (43.96%), seguida por la de uso (1.09%).

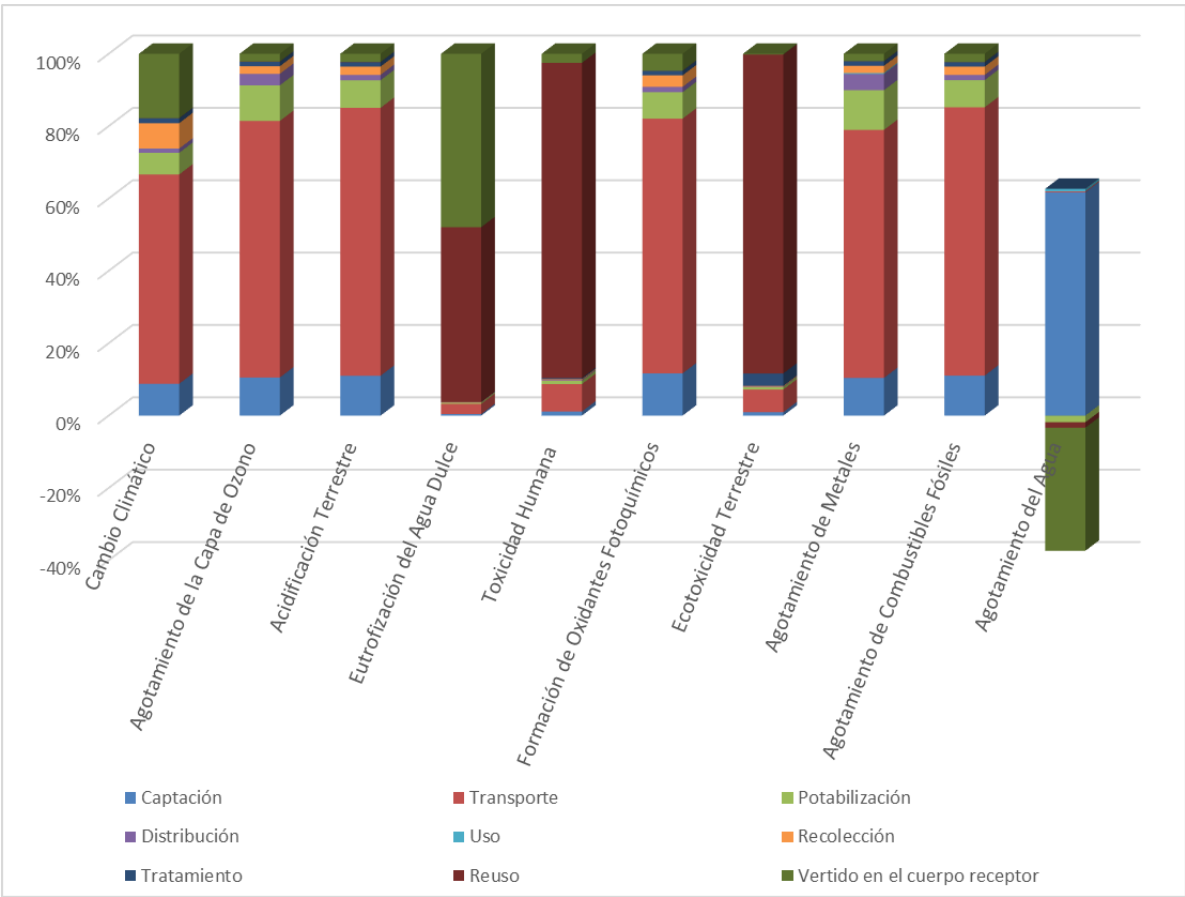


Figura 6.1.- Aportación Porcentual por Proceso para Cada Categoría de Impacto

Con el objetivo de comparar los valores obtenidos para cada categoría de impacto, entre las diferentes etapas, se obtuvieron valores normalizados. En la Figura 6.2 se observa que la etapa que presenta valores máximos para 6 (cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, acidificación terrestre, formación de oxidantes fotoquímicos, agotamiento de recursos minerales y agotamiento de combustibles fósiles) de las 10 categorías de impacto es la de transporte. En segundo lugar se encuentra la etapa de reúso, que presenta valores máximos para las etapas de eutrofización del agua dulce, toxicidad humana y ecotoxicidad terrestre.

Sin embargo, para el caso de la categoría de impacto de eutrofización de agua dulce, las etapas de reúso y vertido en el cuerpo receptor presentan valores prácticamente idénticos, con una diferencia menor al 1%. En tercer lugar se encuentra la etapa de captación, la cual presenta el valor máximo para la categoría de agotamiento del agua. En esta categoría también destaca el hecho de que las etapas de recolección junto con vertido en el cuerpo receptor tienen aportaciones importantes que suman poco más del 40%.

Cabe destacar que la etapa de uso es la que presenta valores mínimos en 8 de las 10 categorías de impacto, siendo las únicas dos excepciones, las categorías de agotamiento de recursos minerales y agotamiento del agua.

Finalmente, cabe mencionar que para la categoría de impacto correspondiente a agotamiento del agua, el valor máximo corresponde a la etapa de captación ($1.67m^3$). En contraste, para esta misma categoría de impacto, las etapas de potabilización, reúso y vertido en el cuerpo receptor presentan valores negativos, destacando entre estos, el correspondiente a la etapa de vertido en el cuerpo receptor ($-0.92m^3$) (Figura 6.2).

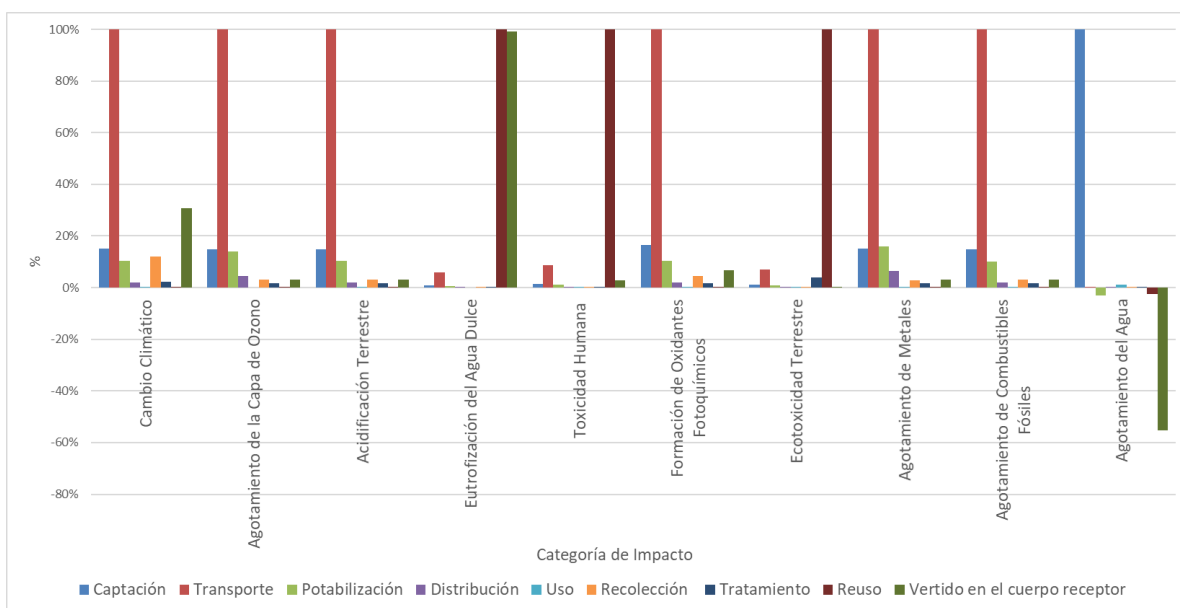


Figura 6.2.- Aportación Porcentual por Proceso para Cada Categoría de Impacto con Valores Normalizados

6.1 Cambio Climático

En la Figura 6.3 se presentan los resultados para Cambio Climático, en la cual se observa que las etapas que presentan impactos mayores son las de captación, transporte, potabilización recolección y vertido en el cuerpo receptor, mismas que constituyen el 97.40% de los impactos cuantificados para esta categoría. Muy por debajo de las etapas antes mencionadas se encuentran las etapas de distribución, uso, tratamiento y reúso, las cuales contribuyen solamente con un 2.59% de los impactos.

Con respecto a la etapa de transporte, tenemos que , para esta categoría de impacto, el valor es de $2.39 \text{ kg CO}_2 \text{ eq /m}^3$, aspecto que se debe en su mayoría al consumo energético de las operaciones de bombeo del agua proveniente del sistema Cutzamala, que transporta el 27.36% (aproximadamente $8.6 \text{ m}^3/\text{s}$) del agua suministrada a la CDMX, recorriendo una distancia que supera los 100 km, venciendo un gradiente altitudinal de más de 1000 metros, con un consumo de 5.403 kWh/m^3 . Cabe mencionar que el sistema Cutzamala es uno de los sistemas de suministro de agua potable de mayores dimensiones en el mundo, ya que cuenta con 6 plantas de bombeo que operan de manera permanente con una capacidad va de los $5.1 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta los $29.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Además, los equipos de bombeo funcionan con energía eléctrica que, en el caso de la CDMX proviene, en su mayoría de plantas termoeléctricas de ciclo combinado.

Después de la etapa de transporte ($2.39 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^3$), la etapa que presenta un mayor impacto es la correspondiente a vertido en el cuerpo receptor , en la cual se observa que el valor para esta categoría de impacto es de $0.73 \text{ kg CO}_2 \text{ eq /m}^3$, aspecto que contrasta con el valor observado para la etapa de transporte, ya que si bien, el suministro de agua a partir de una fuente distante como es la cuenca adyacente a la que pertenece el sistema Cutzamala implica un consumo de energía importante, el agua residual que se colecta en el sistema de drenaje de la CDMX también es bombeada con equipos que presentan un consumo energético considerable (0.133 kWh/m^3), además de que aproximadamente un 10% de los equipos que se operan para el manejo de las aguas residuales en la red de drenaje operan con diésel.

Con respecto a la etapa de captación se puede observar que el valor para esta categoría de impacto es de $0.36 \text{ kg CO}_2 \text{ eq /m}^3$, aspecto que contrasta con las etapas antes mencionadas.

En el caso de la etapa de captación se debe considerar que, aunque la operación de los pozos dentro y fuera de la CDMX tienen un consumo energético importante (0.638 kWh/m^3), no es equiparable, en términos de impacto, a los valores correspondientes a las etapas antes referidas.

Aunque podría considerarse que la etapa de tratamiento debería presentar un valor alto para esta categoría de impacto debido a factores tales como la emisión de GEI durante el proceso de tratamiento, al consumo energético durante el proceso y a la producción de lodos, se observa que para esta categoría de impacto es de $0.056 \text{ kg de CO}_2 \text{ eq/m}^3$. Lo anterior responde, en parte, a que menos del 10% de las aguas residuales que se producen en la CDMX reciben algún tipo de tratamiento, aunque cabe mencionar que el consumo energético reportado es de 0.813 kWh/m^3 , cuestión que contrasta con otras etapas que presentan un consumo energético menor pero que presentan un impacto mayor para esta categoría.

La etapa de distribución presenta para esta categoría de impacto un valor de $0.048 \text{ kg CO}_2 \text{ eq / m}^3$, lo cual contrasta con el valor de las etapas de captación y transporte que, a pesar de ser parte de las operaciones de suministro de agua, presentan valores considerablemente mayores que los de la etapa de distribución. En este sentido, es importante considerar que una parte importante del sistema de distribución de agua en la CDMX funciona por gravedad, es decir, el agua proveniente de la etapa de transporte se entrega en puntos ubicados en partes altas de la cuenca. Por otra parte, el agua proveniente de pozos, generalmente se distribuye mediante la operación de equipos de bombeo de poca potencia que reportan un consumo de 0.036 kWh/m^3 , en contraste con los equipos utilizados para la etapa de transporte.

Finalmente, con respecto a las etapas de uso y reúso se observa que son las que presentan valores menores de impacto para esta categoría, con $0.00032 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^3$ y $0.0017 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^3$ respectivamente. En este sentido, cabe mencionar que para la etapa de uso solamente se considera la operación de equipos de bombeo de poca potencia y, con base en lo reportado por el INEGI (2015), también se considera que solamente el 23.45% de los hogares en la CDMX cuentan con equipos de este tipo. No se considera el uso de garrafones de agua ni botellas ni tinacos.

Con respecto al reúso, cabe mencionar que solamente el 8% de las aguas residuales son tratadas y reutilizadas, por lo que las operaciones de bombeo para tal fin reportan un consumo de energía bajo (0.036 kWh/m^3) en comparación con otras etapas.

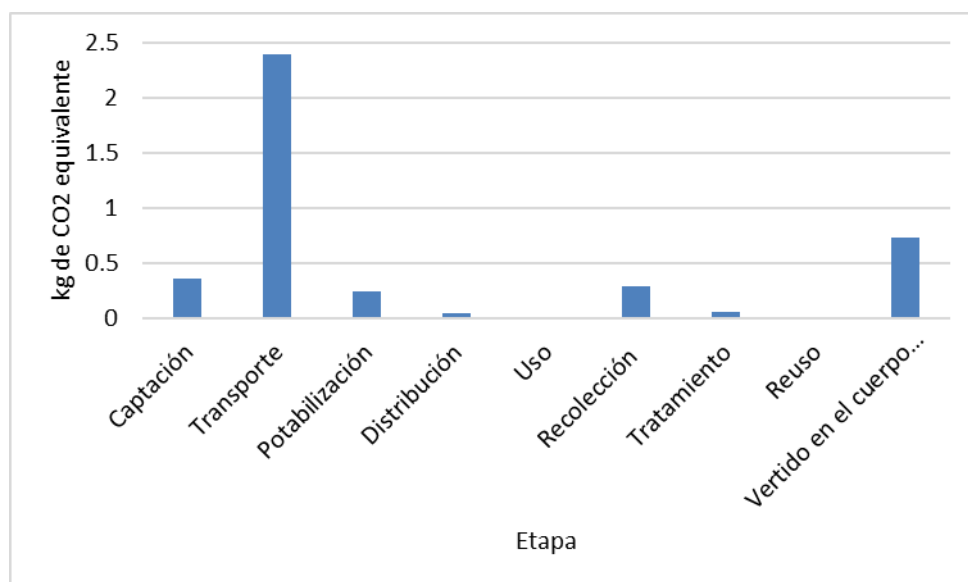


Figura 6.3.- Contribuciones a la Categoría de Cambio Climático

Cabe mencionar que resulta difícil comparar los resultados obtenidos en este trabajo con los reportados por otros autores, principalmente debido a diferencias metodológicas, tales como las etapas consideradas o las metodologías de análisis utilizadas. En este trabajo se obtuvo un valor total de $4.14 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^3$, en tanto que el estudio de Amores et al. (2013) realizado en España reporta un valor total de $0.864 \text{ kg de CO}_2 \text{ eq / m}^3$, el estudio de Friedrich et al.,(2009a) realizado en Sudáfrica reporta $0.481 \text{ kg de CO}_2 \text{ eq / m}^3$ y el estudio de Jeong et al., (2015) realizado en Estados Unidos de América reporta $1.97 \text{ kg de CO}_2 \text{ eq / m}^3$. Lo anterior es coherente con la realidad de la CDMX ya que las ciudades mencionadas no requieren el transporte que se realiza aquí ni son vertidas y/o reutilizadas sin tratamiento.

6.2 Reducción de la capa de ozono

Como se observa en la Figura 6.4, la etapa de transporte es la que presenta un mayor impacto para esta categoría, con un valor de $2.23\text{E-}07$ kg de CFC-11 eq/m³, seguida por la etapa de captación con un valor de $3.13\text{E-}08$ kg de CFC-11 eq/m³ y por la etapa de potabilización con un valor de $3.10\text{E-}08$ kg. de CFC-11 eq/m³. Esto, al igual que para la categoría de cambio climático se debe al consumo energético resultante de las operaciones de bombeo de agua.

Por otra parte, con respecto a la etapa de distribución se aprecia que se encuentra en cuarto lugar de importancia, con un valor de $9.99\text{E-}09$ kg de CFC-11 eq/m³. Este resultado contrasta con lo observado en la categoría de impacto revisada previamente. Esto se debe, en parte, a que en esta categoría se evalúan compuestos relacionados con la destrucción de la capa de ozono, incluyendo los relacionados con la generación de energía eléctrica. Asimismo, destaca el hecho de que, para esta categoría de impacto, los valores para las etapas de vertido en el cuerpo receptor y recolección sean muy similares, en tanto que para la categoría de impacto revisada anteriormente la diferencia era de poco más de 39%.

Aunque las etapas de recolección, distribución, tratamiento, uso y reúso parecen aportar poco en esta categoría, en conjunto sus aportaciones rebasan a la etapa de vertido en el cuerpo receptor, ya que suman $2.06\text{E-}08$ kg de CFC-11 eq/m³.

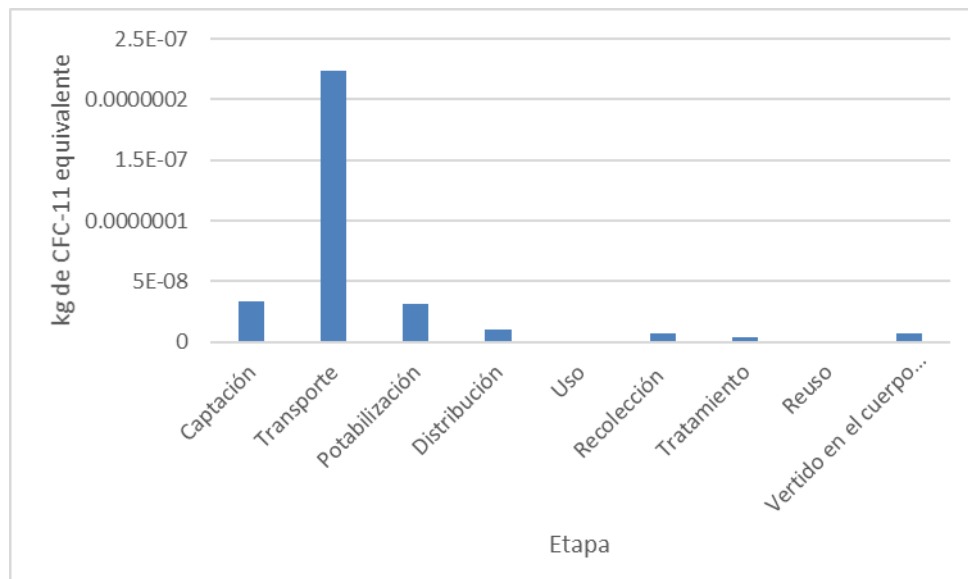


Figura 6.4.- Contribuciones a la Categoría de Reducción de la Capa de Ozono

Para este trabajo, el valor total para esta categoría de impacto es de $3.15E-07$ kg de CFC-11 eq/m^3 ; valor en el mismo orden de magnitud que el de $1.17E-07$ kg de CFC-11 eq/m^3 reportado por Amores et al. (2013) y al de $1.16E-07$ kg de CFC-11 eq/m^3 reportado por Jeong et al. (2015). Sin embargo, estos valores contrastan con el valor de $1.10E-08$ kg de CFC-11 eq/m^3 obtenido por Friedrich et al. (2009a).

6.3 Toxicidad humana

Con respecto esta categoría de impacto se puede observar en la Figura 6.5 que el reúso es la etapa que registra un valor mayor, siendo de 4.79 kg de 1,4-DB eq / m³. Esto se debe a que una parte del reúso corresponde al riego de tierras agrícolas con aguas residuales, sin tratamiento previo, provenientes de la CDMX. Este proceso se lleva a cabo principalmente en los distritos de riego 100 y 003 del estado de Hidalgo, donde desde hace más de 100 años se utiliza el agua residual de la CDMX para estas actividades.

Debido a que las aguas que se vierten en el suelo contienen sólidos suspendidos, DBO₅ y metales pesados, entre otros contaminantes, el impacto registrado para esta etapa es notablemente mayor que el registrado en otras.

Se observa que las etapas de transporte y vertido en el cuerpo receptor son las que siguen en magnitud con 0.41kg de 1,4-DB eq / m³ y 0.138 kg de 1,4-DB eq / m³, respectivamente.

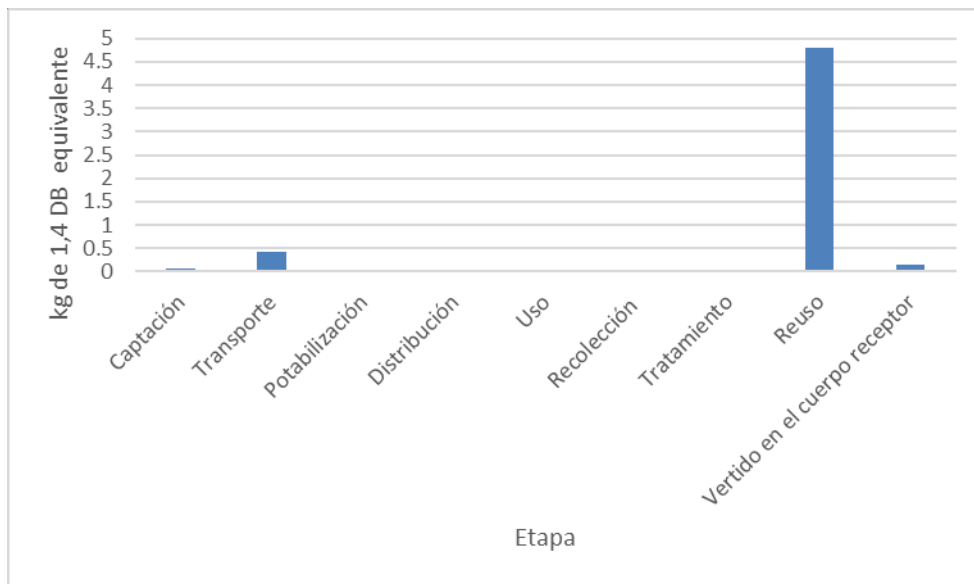


Figura 6.5 .-Contribuciones a la Categoría de Toxicidad Humana

Al calcular el valor total para esta categoría de impacto se obtuvo un valor de 5.50 kg de 1,4-DB eq / m³, que contrasta con el valor de 2.27 kg de 1,4-DB eq / m³ reportado por Amores

et al. (2013) y con el valor de $1.49\text{E-}02$ kg de 1,4-DB eq / m^3 reportado por Friedrich et al. (2009a).

6.4 Formación de oxidantes fotoquímicos

En esta categoría se observa (Figura 6.6) que la etapa de transporte es la que presenta un valor mayor, con $7.46\text{E-}03$ kg de NMVOC/ m^3 , seguido por las etapas de captación y potabilización con $1.24\text{E-}03$ kg de NMVOC/ m^3 y $7.75\text{E-}04$ kg de NMVOC/ m^3 , respectivamente.

Al igual que la categoría de Cambio Climático, la formación de oxidantes fotoquímicos está estrechamente relacionada con el uso de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, ya que los compuestos orgánicos volátiles (VOC por sus siglas en inglés) son subproductos de las reacciones químicas que se llevan a cabo durante la quema de dichos combustibles, liberándose a la tropósfera y participando en las reacciones químicas formadoras de ozono. Es por ello que las etapas que presentan mayor consumo energético son las que, a su vez presentan valores mayores para esta categoría.

El valor para la formación de oxidantes fotoquímicos, considerando todas las etapas de este estudio, es de $1.06\text{E-}02$ kg de NMVOC/ m^3 . Aunque los trabajos de Amores et al. (2013), Friedrich et al. (2009a) y Jeong et al. (2015) reportan la formación de oxidantes fotoquímicos, los valores no son comparables, debido a que utilizan una metodología distinta, y en consecuencia, se expresan los resultados en unidades diferentes.

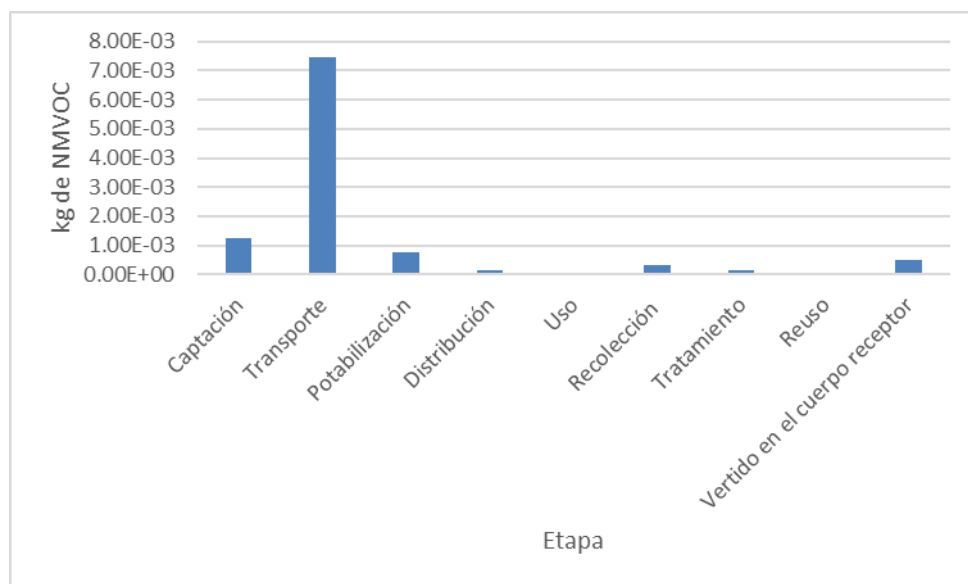


Figura 6.6.- Contribuciones a la Categoría de Oxidantes Fotoquímicos

6.5 Acidificación terrestre

Al igual que en la categoría correspondiente a oxidantes fotoquímicos, en esta categoría se observa (Figura 6.7) que la etapa que contribuye de manera significativa a los impactos es la de transporte, la cual, presenta un valor de $1.57E-02$ kg de SO_2 eq/ m^3 , en tanto que el valor que le sucede en orden decreciente es de $2.34E-03$ kg de SO_2 eq/ m^3 que corresponde a la etapa de captación, seguida por la de potabilización con un valor de $1.62E-03$ kg de SO_2 eq/ m^3 . Como se observa en el gráfico antes referido, las etapas de distribución, uso, tratamiento y reúso son las etapas que presentan valores menores de impacto.

Como se mencionó en secciones anteriores, las principales emisiones acidificantes de origen antropogénico corresponden a NO_x , NH_3 y SO_2 . Cabe mencionar que tanto NO_x como SO_2 pueden ser emitidas como resultado de la quema de combustibles fósiles efectuada como parte del proceso de generación de energía eléctrica. En este sentido, se esperaría que existiera una correlación clara entre los valores de esta categoría de impacto por cada etapa, con los valores de consumo de energía eléctrico por etapa (kWh/ m^3). Sin embargo, se observa un aspecto interesante; el consumo energético de la etapa de uso es de 0.077 kWh/ m^3 y su contribución a esta categoría de impacto es de $6.83E-08$ kg de SO_2 eq/ m^3 , en tanto que para la etapa de reúso el consumo energético es de 0.036 kWh/ m^3 y la contribución a esta categoría de impacto es de $1.13E-05$ kg de SO_2 eq/ m^3 . Lo anterior, aunque parecería contraintuitivo, se debe a que la etapa de reúso registra descargas al suelo de aguas residuales con contaminantes diversos, los cuales inciden directamente en la acidificación terrestre. Tal es el caso de los nitratos vertidos al suelo como resultado del uso de aguas residuales para riego agrícola en el Valle del Mezquital. En el mismo sentido, cabe mencionar que autores como Rana et al. (2010), Alghobar et al. (2014) y Al-Jaboobi et al. (2014) han documentado que el uso de aguas residuales para riego agrícola produce una disminución del pH del suelo.

Por otra parte, en contraste con lo anterior, es importante mencionar que el inventario correspondiente a la etapa de uso solamente incluye el consumo de energía eléctrica para bombeo de $1m^3$ de agua.

La contribución a esta categoría de impacto considerando todas las etapas analizadas es de $2.12E-02$ kg de SO_2 eq/ m^3 , en tanto que los valores reportados por Jeong et al. (2015),

Friedrich et al. (2009a) y Amores et al. (2013) son de $1.02\text{E-}02$ kg de SO_2 eq/ m^3 , $2.85\text{E-}03$ kg de SO_2 eq/ m^3 y $6.62\text{E-}03$ kg de SO_2 eq/ m^3 respectivamente.

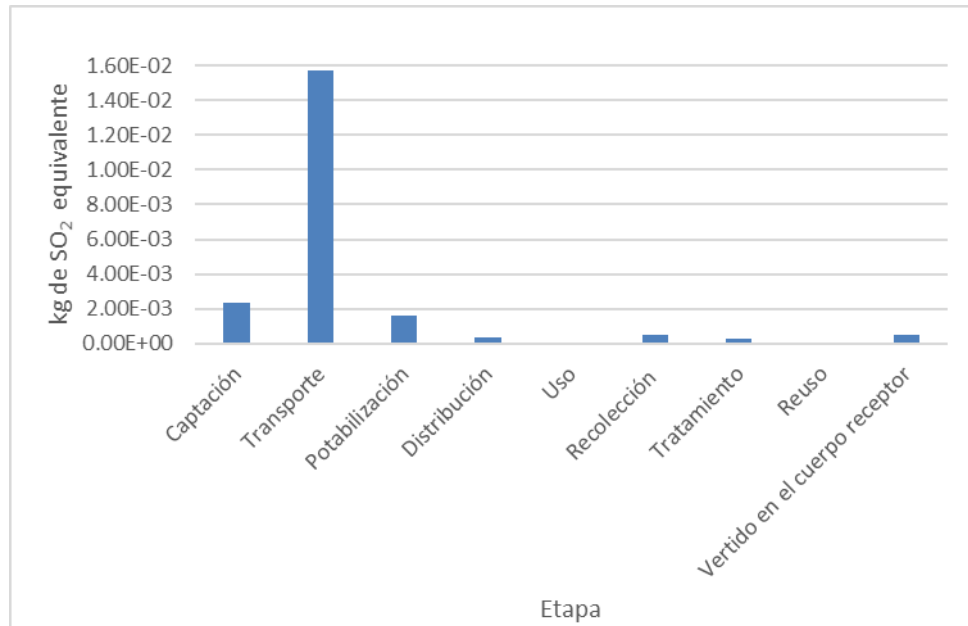


Figura 6.7.- Contribuciones al Categoría de Acidificación Terrestre

6.6 Eutrofización del agua dulce

Para el caso de las CDMX, la eutrofización del agua dulce es una de las categorías de impacto que resultan de mayor interés, en vista de que menos del 10% del agua recibe tratamiento adecuado y, en su mayoría son descargadas de manera temporal o permanente en cuerpos de agua como presas de regulación o lagos.

En la Figura 6.8 se observa que las etapas que contribuyen de manera significativa a esta categoría de impacto son las de reúso y vertido en el cuerpo receptor, con valores de $7.43E-03$ kg de P eq/m³ y $7.37E-03$ kg de P eq/m³, respectivamente. . En el caso de la etapa de transporte las aportaciones pueden corresponder a los procesos de cloración que se efectúan utilizando hipoclorito de sodio y cloro en estado gaseoso y, en menor medida, debido al consumo energético. En esta etapa el valor para la categoría de impacto es de $4.33E-04$ kg de P eq/m³.

Como ya se mencionó anteriormente y como se puede observar en la sección de análisis del inventario, en las etapas de reúso y vertido en el cuerpo receptor se registran descargas de aguas sin tratar tanto a cuerpos de agua como al suelo, cuestión que genera impactos considerables en los ecosistemas acuáticos. Se puede observar que las aguas residuales contienen fósforo (P), DBO₅ y metales pesados, los cuales tienen como destino final cuerpos de agua y/o el suelo. Cabe mencionar que los detergentes vertidos como resultado de las actividades domésticas es una fuente de fósforo, el cual, como ya se mencionó es uno de los macronutrientes más importantes que promueven y aceleran los procesos de eutrofización. Aunque en esta categoría de impacto es complicado hacer comparaciones adecuadas con otros estudios, principalmente debido a que en otras latitudes el tratamiento de aguas residuales municipales se lleva a cabo en un porcentaje mayor del agua, y a que la práctica de verter el agua residual sin tratamiento en cuerpos de agua o en suelos es menos frecuente, los estudios de Jeong et al. (2015), Friedrich et al. (2009a) y Amores et al. (2013) reportan valores para esta categoría de impacto de $1.01E-02$ kg de P eq/m³, $2.05E-04$ kg de PO₄ eq/m³ y $1.69E-03$ kg de PO₄ eq/m³ respectivamente. Para este estudio el valor total para esta categoría de impacto fue de $1.54E-02$ kg de P eq/m³, que es cercana a la reportada por

Jeong et al. (2015) para el estudio realizado en la Ciudad de Atlanta, Georgia en los Estados Unidos de América.

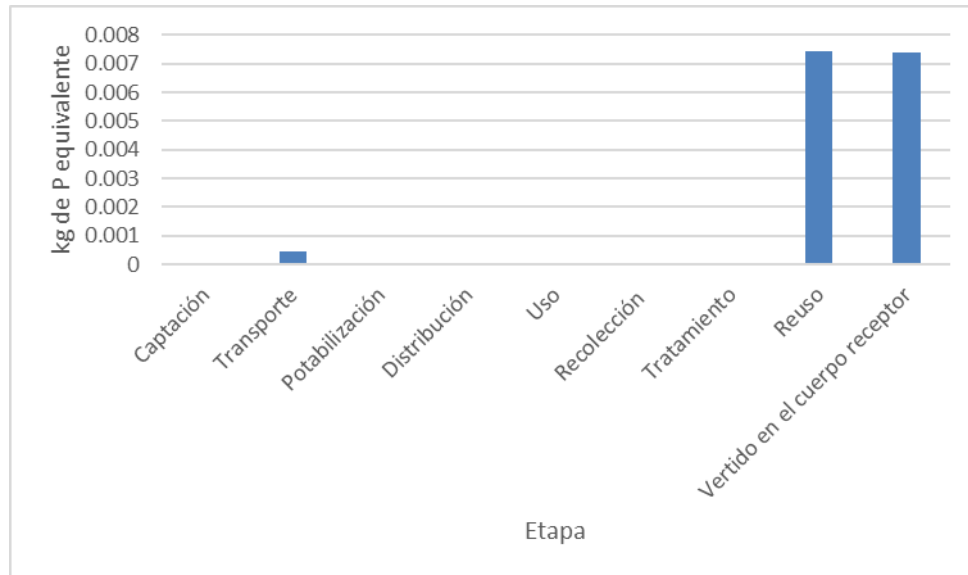


Figura 6.8.- Contribuciones a la Categoría de Eutrofización del Agua Dulce

6.7 Ecotoxicidad terrestre

Al igual que la categoría de eutrofización del agua dulce, la categoría de ecotoxicidad terrestre es de especial relevancia para el contexto de la CDMX, ya que, como se ha mencionado en otros apartados, la mayor parte de las aguas residuales municipales producidas en la CDMX se reúsan como agua de riego en el valle de Tula, en el estado de Hidalgo. Debido a que esta práctica se ha realizado por varias décadas, es de especial interés considerar este tipo de impactos.

En la Figura 6.9 se aprecia que la etapa que tiene un valor mayor para esta categoría es la de reúso, con $2.78\text{E-}03$ kg de 1,4-DB eq/m³.

Como ya se ha mencionado y como se puede observar en la sección de análisis de inventario, las aguas residuales municipales provenientes de las CDMX y que se son utilizadas para el riego agrícola, contienen, además de macronutrientes como el fósforo (P) y el nitrógeno (N), elementos cuyos efectos tóxicos en ecosistemas terrestres bien conocidos, como es el caso del arsénico (As), cianuro (CN⁻), cromo, (Cr) , mercurio (Hg), nickel (Ni) y como (Cr).

Con respecto a la etapa de tratamiento, se puede observar que presenta un valor de $1.10\text{E-}04$ kg de 1,4-DB eq/m³ que, si bien difiere considerablemente del valor correspondiente a la etapa de reúso, es relevante debido a que refleja, principalmente el efecto de la producción y disposición de los residuos sólidos provenientes del proceso de lodos activados, el cual es el más utilizado para el tratamiento de las aguas residuales de la CDMX. Si bien es cierto que la contribución de esta etapa a la categoría de impacto es del 3.4%, también hay que considerar que menos del 10% de las aguas residuales de la CDMX reciben tratamiento, es por ello que esta etapa debería ser considerada con atención debido a que, de incrementarse el volumen de agua residual tratada en la CDMX, como está planeado en los próximos años, esta etapa podría incrementar considerablemente su valor y en consecuencia su impacto. Cabe mencionar que, de acuerdo con lo reportado por Hernández Padilla (2016), los residuos sólidos provenientes del proceso de tratamiento de aguas residuales municipales mediante la tecnología de lodos activados no recibe una disposición adecuada en nuestro país.

En esta categoría de impacto, al igual que en la precedente es difícil hacer comparaciones con otros sistemas de agua en el mundo, ya que en otras naciones no se llevan a cabo prácticas de reúso de aguas residuales sin tratamiento, como en el caso de México.

Para esta categoría de impacto se obtuvo un valor total de $3.16E-03$ kg de 1,4-DB eq/m³, valor que contrasta notablemente con lo reportados por Amores et al. (2013) y Friedrich et al. (2009a) que presentan valores, para esta categoría, de 2.27 kg de 1,4-DB eq/m³ y 7.88E-01 kg de 1,4-DB eq/m³ respectivamente.

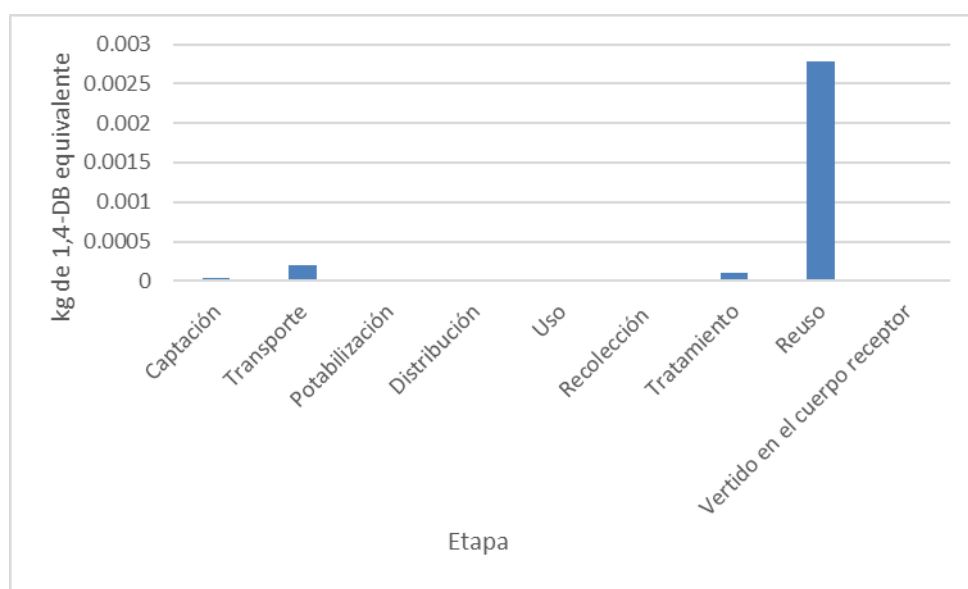


Figura 6.9.- Contribuciones a la Categoría de Ecotoxicidad Terrestre

6.8 Agotamiento del agua

En esta categoría se evalúa el consumo de agua en cada etapa. En la Figura 6.10 se observa que la etapa que presenta un valor mayor es la de captación, ya que es el punto inicial en el que se extrae el recurso de sus fuentes naturales, ya sean subterráneas o superficiales. El valor para esta etapa es de 1.67m^3 , en vista de que, para contar con 1m^3 de agua disponible, es necesario extraer 1.67m^3 , de los cuales 0.67m^3 (40%) corresponden a las pérdidas físicas en la etapa de distribución. Se observa que en las etapas de transporte, distribución, uso, recolección y tratamiento se presentan valores positivos que indican un consumo de agua indirecto debido a la producción de reactivos que se utilizan en la etapa o a la generación de la energía requerida en la misma. Cabe destacar que en la etapa de potabilización se observa un valor negativo de $-4.88\text{E}-02\text{ m}^3$, que corresponde al agua que se retorna al drenaje durante el proceso de potabilización, la cual es de aproximadamente 3%. Este volumen de agua se considera que retorna, en última instancia al medio ambiente.

Por otra parte, destaca también el hecho de que el reúso presenta un valor también negativo de $-4.0\text{E}-02\text{ m}^3$, el cual corresponde al agua tratada adecuadamente que es utilizada para suministrar agua a sistemas lacustres remanentes en la CDMX. En este caso también se considera que el agua retorna a los ecosistemas de la zona.

En el caso de la etapa de vertido en el cuerpo receptor se observa que el valor correspondiente a esta categoría de impacto es de $-9.20\text{E}-01\text{ m}^3$, aspecto que refleja el hecho de que el agua es vertida en lagunas de regulación o presas antes de ser encausada a su destino final.

Es importante mencionar que esta categoría de impacto solamente cuantifica el volumen de agua extraído de la o las fuentes de suministro, el volumen de agua que se consume directa o indirectamente en cada etapa y el volumen de agua que se devuelve al ambiente. Sin embargo, no considera la calidad con la que retorna el agua ni tampoco el hecho que un porcentaje importante del líquido que se utiliza en la CDMX proviene de cuencas vecinas, a las cuales no se retornará para promover la recarga de los mantos acuíferos. En este sentido, cabe mencionar que los trabajos de Amores et al. (2013), Friedrich et al. (2009a) y Jeong et al. (2015) no reportan esta categoría de impacto.

Cabe mencionar que Simapro 8.5.2.0 y Ecoinvent 3.01 no cuentan con un módulo específico que haga referencia a las pérdidas físicas (fugas) en sistemas de distribución de agua urbana, por lo cual no se observa, de manera directa, la pérdida física de 0.67m^3 de agua en el gráfico en la etapa de distribución. Este aspecto, de acuerdo con la metodología propuesta por Friedrich et al. (2009a, 2009b) y Klinglmair et al. (2014) se abordó considerando la extracción de agua (1.67m^3) y el volumen de agua que regresa al ambiente (1.0m^3). El volumen de agua que regresa al ambiente, corresponde a las etapas de potabilización ($-4.88\text{E}-02\text{m}^3$), reúso ($-4.0\text{E}-02\text{m}^3$), y vertido en el cuerpo receptor ($-9.20\text{E}-01\text{m}^3$). Así, la suma de agua extraída y el agua devuelta a ambiente es de 0.67m^3 ($1.67\text{m}^3 + (-1.00\text{m}^3)$), que corresponde, precisamente la pérdida de 40% en la etapa de distribución.

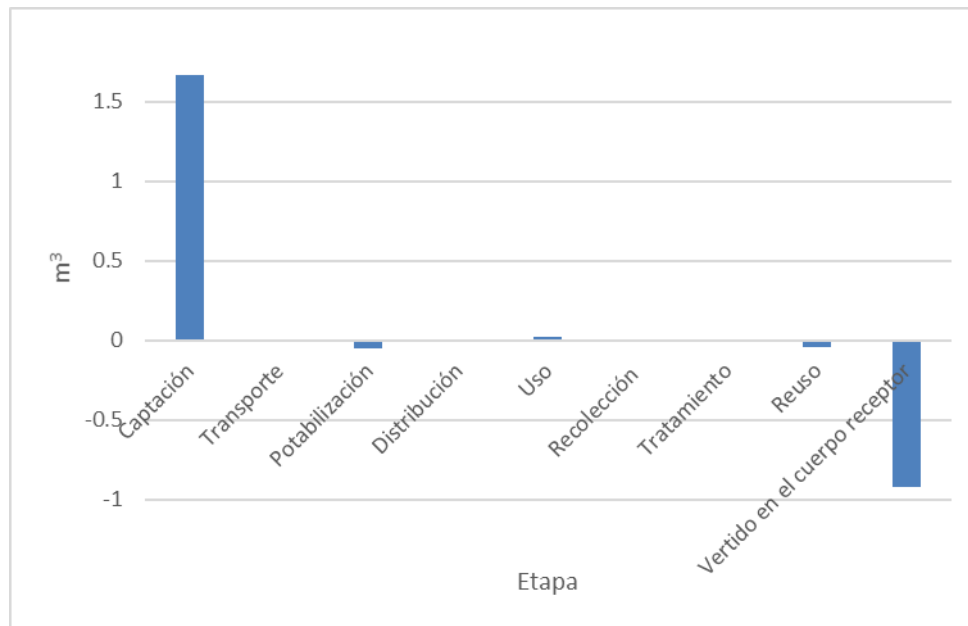


Figura 6.10.- Contribuciones a la Categoría de Agotamiento del Agua

6.9 Agotamiento de Metales

Aunque la evaluación de los impactos debidos a la construcción y desmantelamiento de la infraestructura no forma parte de este estudio, es importante considerar que, independientemente de ello, existe un consumo indirecto de metales para la operación del sistema, es decir, incluye los procesos involucrados en la generación de energía, así como la producción de reactivos utilizados en las etapas que así lo requieren.

En la Figura 6.11 podemos observar que la etapa de transporte es la que presenta un valor mayor para esta categoría con $2.22E-02$ kg de Fe eq/m³, seguido por las etapas de potabilización y captación con valores de $3.56E-03$ kg de Fe eq/m³ y $3.38E-03$ kg de Fe eq/m³. En este aspecto, es importante mencionar que, si bien la etapa de captación presenta un consumo de energía eléctrica mayor (0.638 kWh/m³) que la de potabilización (0.230 kWh/m³), es en la etapa de potabilización en la que se usan un mayor número de reactivos, tales hipoclorito de sodio, peróxido de hidrógeno, ácido fosfórico, cloro y sulfato de aluminio, entre otros.

Con respecto a la etapa de distribución, el valor para esta categoría de impacto es de $1.45E-03$ kg de Fe eq/m³. Es importante considerar que en esta etapa se utiliza hipoclorito de sodio y cloro (gas) para mantener la calidad del agua durante el proceso de distribución en la red.

Finalmente, las etapas de recolección, tratamiento y vertido en el cuerpo receptor presentan los valores menores, que corresponden a $6.45E-04$ kg de Fe eq/m³, $4.03E-04$ kg de Fe eq/m³ y $6.59E-04$ kg de Fe eq/m³ respectivamente. Esto se debe, principalmente, a que su consumo energético es bajo y a que utilizan pocos reactivos.

Para esta categoría de impacto, los trabajos de Amores et al. (2013), Friedrich et al. (2009a) y Jeong et al. (2015) no reportan resultados.

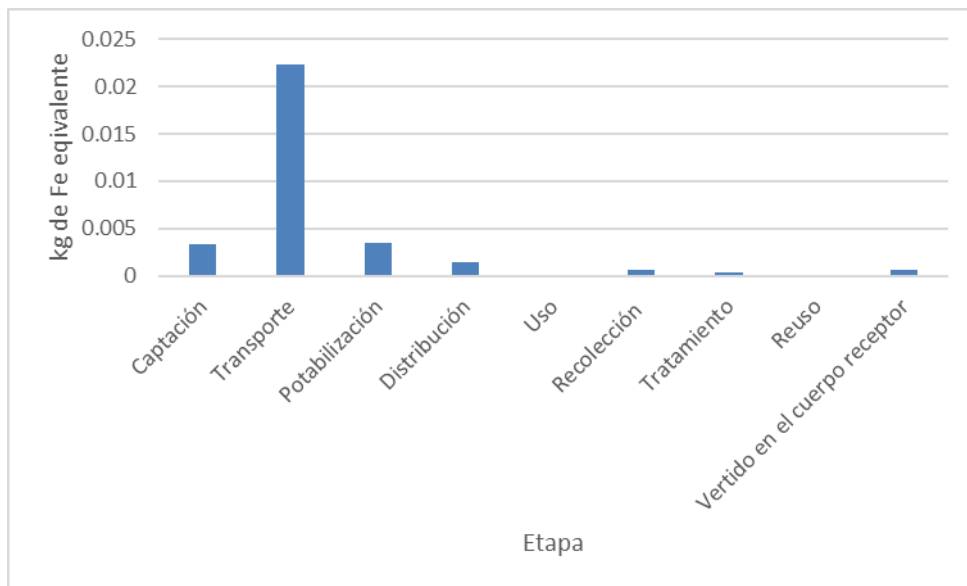


Figura 6.11.- Contribuciones a la Categoría de Agotamiento de los Metales

6.10 Agotamiento de los combustibles fósiles

En el ámbito del estudio de los sistemas de agua urbanos y, en particular, cuando se estudian utilizando la metodología de análisis de ciclo de vida, el consumo de combustibles fósiles es uno de los aspectos de mayor relevancia a considerar, en virtud de que es el factor causal de una gran variedad de impactos. Actualmente es aceptado de manera amplia el hecho de que el binomio agua-energía es inseparable, en vista de que para acceder y poder utilizar el recurso de manera eficiente es necesario el uso de energía, aspecto que, para gran parte del mundo continúa estando ligado al consumo de combustibles fósiles.

En la Figura 6.12 podemos observar que para el caso de la CDMX, la etapa que presenta de manera evidente aportaciones mayores en esta categoría de impacto es la de transporte, con un valor de 0.817 kg de petróleo eq/m³. En este punto, el resultado coincide con el valor de consumo de energía de 5.430 kWh/m³.

Como ya se ha mencionado, una contribución importante a este rubro es el hecho de que el agua proveniente del Sistema Cutzamala recorre una distancia importante y vence un gradiente altitudinal considerable.

Con respecto a la captación y potabilización se presentan valores de 0.121 kg de petróleo eq/m³ y 0.083 kg de petróleo eq/m³ respectivamente. En este punto es importante considerar que los valores se ven afectados por el uso de reactivos, ya que en esta categoría también se incluye el impacto de la fabricación y transporte de los reactivos utilizados principalmente en la etapa de potabilización. En el mismo sentido, se observa que el consumo energético para la etapa de captación es de 0.638 kWh/m³ y para la etapa de potabilización de 0.230 kWh/m³.

Las etapas de recolección, tratamiento y vertido en el cuerpo receptor presentan valores de 0.025 kg de petróleo eq/m³, 0.013 kg de petróleo eq/m³ y 0.025 kg de petróleo eq/m³ respectivamente. Lo anterior contrasta con los valores calculados para el consumo de energía que corresponden a 0.133 kWh/m³, 0.813 kWh/m³ y 0.133 kWh/m³ respectivamente. En este sentido, es importante considerar que, para el año de referencia de este estudio (2015), solamente el 8% del agua residual que se producía en la CDMX recibía tratamiento. Cabe

mencionar que, en ese entonces, no se encontraba en operaciones la PTAR de Atotonilco, misma que, actualmente, trata cerca del 60% de las aguas residuales producidas por la CDMX.

Con respecto a las etapas de distribución, uso y reúso, se obtuvieron los siguientes valores: 0.015 kg de petróleo eq/m³, 4.80E-06 kg de petróleo eq/m³ y 5.87E-04 kg de petróleo eq/m³ respectivamente. El consumo energético obtenido para cada etapa es de 0.036 kWh/m³, 0.077 kWh/m³ y 0.036 kWh/m³ respectivamente.

Para esta categoría de impacto, los trabajos de Amores et al. (2013), Friedrich et al. (2009a) y Jeong et al. (2015) no reportan resultados.

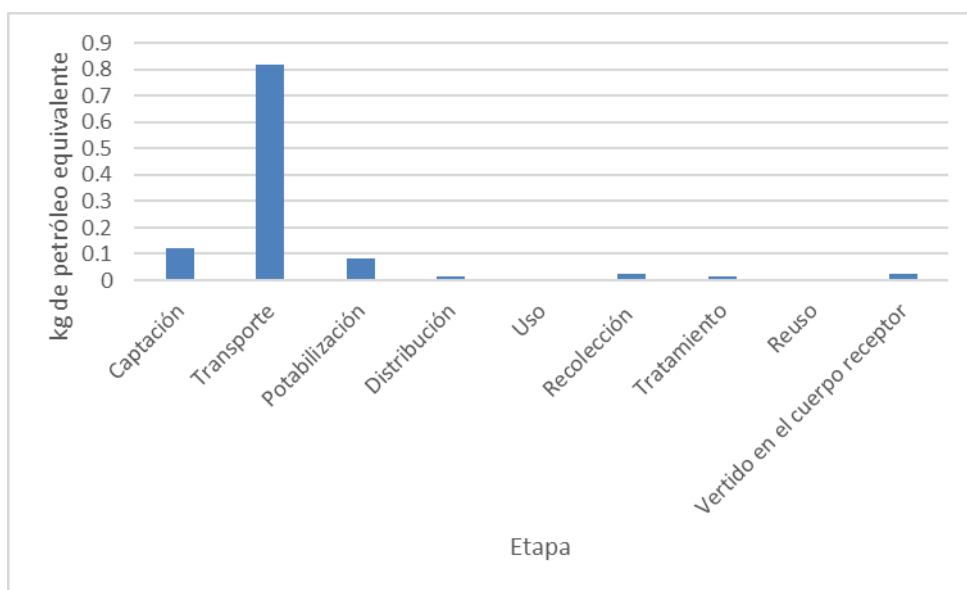


Figura 6.12.- Contribuciones a la Categoría de Agotamiento de Combustibles Fósiles

CONSIDERACIONES FINALES

El Sistema de Gestión Hídrica de la CDMX, como cualquier sistema de agua urbana, produce impactos ambientales que son consecuencia de los procesos que integran sus distintas etapas.

En este contexto, es claro que uno de los aspectos de mayor interés es el consumo de energía eléctrica que, como hemos visto para el caso de la CDMX, presenta el valor más elevado, en términos de kWh/m³, en la etapa de transporte, en particular en el segmento que corresponde al agua que proviene del Sistema Cutzamala. Dicho segmento constituye el 90% del consumo para esta etapa (4.865 kWh/m³). Asimismo, el tratamiento de aguas residuales presenta un consumo de energía eléctrica importante (0.813 kWh/m³), ligeramente mayor que el que se observa para la etapa de captación (0.726 kWh/m³).

Cabe mencionar que, con base en el año de referencia para la realización de este estudio (2015), se considera que solamente el 8% de aguas residuales recibe tratamiento. Es por ello que es de suma importancia considerar, en estudios posteriores, el análisis de escenarios, ya que, necesariamente, el incremento en el volumen de agua tratada modificará los impactos correspondientes a esta etapa, principalmente en lo relativo al consumo de energía eléctrica y generación de lodos.

Con base en lo antes referido, es necesario prestar atención especial a las operaciones que se llevan a cabo en la etapa de transporte, ya que es la que presenta la mayor aportación porcentual a los impactos en 6 de las 10 categorías estudiadas. Este es uno de los puntos que debe ser abordado con más detalle en el futuro, ya que el consumo energético debido al transporte del agua desde una cuenca vecina genera impactos ambientales importantes.

En el mismo sentido, destaca el hecho de que la etapa de vertido de agua no tratada en el cuerpo receptor aporta un porcentaje considerable de los impactos a las categorías de cambio climático y eutrofización, con 17.76% y 47.92% , respectivamente. Cabe mencionar que para esta etapa se presentan valores negativos para la categoría de agotamiento del agua, sin embargo, hay que considerar que se trata de agua no tratada que, si bien regresa al ambiente, no tiene la calidad adecuada y este valor solamente representa el retorno de parte del volumen total extraído.

En este punto, es claro que el incremento en el caudal de aguas residuales que son tratadas, además del uso de tecnologías que permitan la recuperación de nutrientes para ser aprovechados reduciría los impactos ambientales causados por verter el agua sin tratamiento en cuerpos de agua o al suelo. Además, el aprovechamiento del biogás generado como parte del proceso de tratamiento permitiría reducir el consumo de energía del sistema de gestión hídrica de la CDMX. Es por ello que el inicio de operaciones de la planta tratamiento de aguas residuales de Atotonilco en el estado de Hidalgo contribuirá de manera significativa a reducir los impactos ambientales de estas etapas, ya que además de incrementar significativamente la capacidad de tratamiento de aguas residuales, cuenta con tecnologías que permitirán la recuperación de los lodos y su uso como fertilizantes, así como la generación de energía eléctrica para sus operaciones mediante el aprovechamiento del biogás.

Otro de los aspectos relevantes a considerar es el hecho de que un porcentaje mínimo (8%) del agua es tratada y posteriormente reutilizada. En consecuencia, es necesario considerar de manera integral las dos etapas, ya que el tratamiento de agua presenta un consumo energético menor (0.813 kWh/m^3) que el que implica el transporte de la misma (5.403 kWh/m^3). En este contexto, el reúso del agua es una alternativa de no poca importancia a ser considerada, ya que implicaría la reducción en el uso de energía eléctrica y la reducción de los impactos ambientales asociados a las etapas de captación y transporte.

En contraste con lo antes expuesto, en la etapa de uso se observan los menores impactos para 8 de las 10 categorías de estudiadas, aspecto que se debe al consumo energético relativamente bajo que se registra en esta etapa. Tal situación es resultado de la limitada fracción de agua residual que se reusa (8%).

Con base en los resultados obtenidos en este estudio, podemos afirmar que el consumo de energía es el factor causal de la mayoría de los impactos y la etapa de transporte es la más relevante en este sentido. Sin embargo, otro de los aspectos que deben ser analizados de manera conjunta es el tratamiento y el reúso del agua, ya que el manejo óptimo de ambas etapas permitirá reducir la presión sobre el recurso hídrico, además de reducir el consumo de energía y los impactos ambientales asociados.

7. Conclusiones

En este trabajo se presenta una primera versión del Inventario de Ciclo de Vida (ICV), para el Sistema de Gestión Hídrica de la Ciudad de México, considerando 9 etapas del Sistema, con base en fuentes de información de calidad, tales como bases de datos de organismos operadores, información oficial, literatura científica e información de primera mano del personal operativo.

El Análisis de Ciclo de Vida de punto medio permitió modelar y cuantificar los valores de 10 categorías de impacto relevantes para el Sistema de Gestión Hídrica de la Ciudad de México, así como identificar las etapas y procesos que presentan una contribución mayor a las categorías de impacto estudiadas.

El consumo de energía eléctrica para el Sistema de Gestión Hídrica de la CDMX es de 7.587kWh/m^3 , siendo la etapa de transporte la que constituye un mayor porcentaje de dicho consumo con un 71.21% (5.403kWh/m^3), del cual, el 90% (4.865kWh/m^3) corresponde al agua que proviene del Sistema Cutzamala. El consumo total del Sistema de Gestión Hídrica asciende a 2675.232 GWh (0.93% del total de la energía consumida en el país).

El consumo de energía eléctrica para la etapa de tratamiento (0.813kWh/m^3), en la que se considera un 8% de aguas tratadas, es tan solo 10.70% mayor que el consumo calculado para la etapa de captación (0.7260kWh/m^3). Debido a la proximidad de los valores de consumo de energía eléctrica para ambas etapas, es claro que, desde esta perspectiva, el reúso del agua tratada debe ser considerado como una alternativa. aspecto que resulta relevante desde la perspectiva del reúso de agua como una alternativa a la captación de agua de fuentes tanto locales como externas a la CDMX.

La etapa que presentó la mayor contribución porcentual a los impactos en un mayor número de categorías (6 de 10) fue la de transporte, ya que contribuye significativamente a la reducción de la capa de ozono (70.90%), acidificación terrestre (74.04%), formación de oxidantes fotoquímicos (70.39%), agotamiento de metales (68.55%) y agotamiento de combustibles fósiles (74.14%). Lo anterior se debe al consumo de energía eléctrica derivado de las operaciones de bombeo.

La etapa de reúso presenta los valores con mayor aportación porcentual para las categorías de toxicidad humana (87.11%) y ecotoxicidad terrestre (88.13%). Esto se debe a que el 92% del agua residual de la CDMX no recibe tratamiento y es reutilizada para riego en el Valle del Mezquital.

La etapa de vertido en el cuerpo receptor contribuye de manera relevante a las categorías de impacto de cambio climático (17.76%) y eutrofización (47.92%), debido a las emisiones de metano provenientes de las aguas residuales en el primer caso y al contenido de compuestos tales como fosfatos en el segundo.

Con respecto a la etapa de vertido en el cuerpo receptor, la categoría de impacto que presenta un menor valor es la de agotamiento del agua (-0.92), lo cual se debe a que el 92% de las aguas residuales de la CDMX son restituidas al ambiente, aunque esta categoría de impacto no considera la calidad de dicho caudal.

La etapa de uso es la que presenta las menores aportaciones porcentuales a las categorías de cambio climático (0.0078%), reducción de la capa de ozono (8.27E-06%), acidificación terrestre (0.00032%), eutrofización del agua dulce (1.36E-07%), toxicidad humana (6.92E-05%), formación de oxidantes fotoquímicos (0.00080%), toxicidad terrestre (3.0E-05%) y agotamiento de combustibles fósiles (0.00043%).

Los impactos ambientales derivados de la operación del Sistema de Gestión Hídrica de la CDMX se agrupan, principalmente en tres etapas: transporte, vertido en el cuerpo receptor y reúso. La etapa de transporte presenta un consumo considerable de energía eléctrica que, en su mayoría corresponde al agua bombeada por el sistema Cutzamala. Así mismo, las etapas tanto de vertido en el cuerpo receptor como de reúso constituyeron, para el año de referencia (2015), fuentes de impactos ambientales considerables, debido al volumen de agua residual que, sin tratamiento, es vertida en cuerpos de agua y que es utilizada para riego agrícola. De acuerdo con esto, las etapas de transporte, vertido en el cuerpo receptor y reúso integran operaciones relevantes desde el punto de vista del impacto ambiental generado y constituyen áreas de oportunidad para la mejora de su desempeño ambiental.

La problemática del agua en la CDMX, como se ha expuesto en el desarrollo del presente trabajo, requiere de un análisis periódico, integral y detallado que incluya nuevos enfoques

metodológicos como es el caso del Análisis de Ciclo de Vida. Es claro que la operación del Sistema de Gestión Hídrica en cuestión, como la de cualquier sistema de suministro de agua en el mundo, genera impactos ambientales, los cuales son susceptibles de ser reducidos y/o mitigados en la medida en que se cuente con información apropiada y suficiente para tal fin. En el mismo sentido, es necesario desarrollar y analizar distintos escenarios de operación del sistema, tanto presentes como futuros y bajo distintos supuestos tanto ambientales como tecnológicos que permitan mejorar la infraestructura y operación para avanzar hacia una gestión integral de los recursos hídricos en la región.

8. Referencias

Alfonsín C., Hospido A., Omil F., Moreira M.T. y Feijoo G., (2014). PPCPs in wastewater-Update and calculation of characterization factors for their inclusion in LCA studies. *Journal of Cleaner Production*. Vol 83, pp 245-255.

Alfonsín C., Lebrero R., Estrada J.M., Muñoz R., Kraakman N.J.R., Feijoo G. y Moreira M.T., (2015). AL-Jaboobi M., Tijane M., EL-Ariqi S., El Housni A., Zouahri A., y Bouksaim M., (2014). Assessment of the impact of wastewater use on soil properties. *Journal of Materials and Environmental Science*. 5 (3): 747-752.

Alghobar M.A., Ramachandra L. y Suresha S., (2014). Effect of Sewage Water Irrigation on Soil Properties and Evaluation of the Accumulation of Elements in Grass Crop in Mysore City, Karnataka, India. *American Journal of Environmental Protection*. 3(5): 283-291.

Secretaría de Energía (SENER), (2016). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional. PRODESEN 2016-2030. Secretaría de Energía, México. 304p. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/98154/PRODESEN_2016-2030-2016-05-30.pdf

Selection of odour removal technologies in wastewater treatment plants: A guideline based on Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*. Vol. 149, pp 77-84.

Amores M.J., Meneses M., Pasqualino J., Antón A. y Castells F., (2013). Environmental assessment of urban water cycle on Mediterranean conditions by LCA approach. *Journal of Cleaner Production* 43, pp. 84-92.

Angrill S., Farreny R., Gasol C.M., Gabarrell X., Viñolas B., Josa A. y Rieradevall J.,(2012). Environmental analysis of rainwater harvesting infrastructures in diffuse and compact urban models of Mediterranean climate. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 17, No. 1, pp 25-42.

Argullol E., (2005). Organización y Funciones de las Metrópolis. Estudio Comparado. Universitat Pompeu Fabra. Treballs Gràfics S.A., Barcelona, España. 70p.

Arreguín F., Ochoa L. y Fernández A., (1997) Evaluación de pérdidas en redes de distribución de agua. TLALOC-AMH, Órgano informativo de la Asociación Mexicana de Hidráulica (AMH), No.10. 1997.

Auvinet G. y Juárez M., (2001). Geotechnical characterization of Mexico City subsoil. 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference. Disponible en: <http://geoserver.ing.puc.cl/info/conferences/PanAm2011/panam2011/pdfs/GEO11Paper1204.pdf>

BID (Banco Interamericano de Desarrollo),(2012). Modelo de Marco Institucional para la Gestión de los Recursos Hídricos en el Valle de México. Primer Informe. Noviembre-2012. Disponible en: http://www.agua.unam.mx/sacmex/assets/docs/IDBDOCS_GRH_ValleMexico.pdf

Banco Mundial,(2013). Agua Urbana en el Valle de México: ¿Un camino verde para mañana?. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento / Banco Mundial, U.S.A. 73p.

Banco Mundial, (2015). América Latina: la región con más agua, la más castigada por la sed. Disponible en: <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2015/05/13/america-latina-la-region-con-mas-agua-la-mas-castigada-por-la-sed>

Bogantes J. y Muiser J.,(2011).Estrategias erróneas y la vulneración de los sistemas hídricos en América Latina. Tribunal Latinoamericano del Agua. 132p.

Bello J., (2016). PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES ATOTONILCO MÉXICO. Zoffnas Program for Sustainable Infrastructure. Graduate School of Design, Harvard University. 79p. Disponible en: https://research.gsd.harvard.edu/zofnass/files/2016/08/05_Atotonico_SP_FinalDocument.pdf

Breña-Puyol A.F. y Breña-Naranjo J.A., (2009). Problemática del recurso agua en grandes ciudades: zona metropolitana del valle de México. Disponible en: <http://www.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n74ne/aguavalle.pdf>

CEP (Consejo Estatal de Población),(2009).Conformación de las zonas metropolitanas: panorama demográfico. Gobierno del Estado de México, México. 44p.

CEZM (Centro de Estudios para la Zona Metropolitana),(2006). Una visión para la Zona Metropolitana del Valle de México. Centro de Estudios para la Zona Metropolitana, A.C. México, 75p.

Campos-López A., (2015). Potabilización del Agua para Suministro en la Ciudad de México. Tesis para obtener el grado de especialista en ingeniería sanitaria. Universidad Nacional Autónoma de México. 252p.

Cifuentes E., Blumenthal U.J., Ruiz-Palacios G., Bennett S. y Peasey A. ,(1994). Escenario epidemiológico del uso agrícola del agua residual: el Valle del Mezquital, México. Salud Pública. México, 36(1), 3-9.

Comisión federal de Electricidad (CFE) ,(2015). Informe Anual 2015. Disponible en: <http://www.cfe.gob.mx/>

CMM (Centro Mario Molina),(2011). Evaluación energética de los actuales sistemas de aguas urbanas y propuestas de manejo de los recursos hídricos en la Ciudad de México. 3p.

CNA (Comisión Nacional del Agua),(2007). Manual de Agua potable, Alcantarillado y Saneamiento. Guía para el Manejo, Estabilización y Disposición de Lodos. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales-Comisión Nacional del Agua. México, 129p.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua),(2009). Estadísticas del Agua en México. Edición 2009. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, 255p.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua),(2012). Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa XIII Aguas del Valle de México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, 230p.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua),(2013). Estadísticas del Agua en la Región Hidrológico-Administrativa XIII. Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, 206p.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua),(2014a). Estadísticas del Agua en México. Edición 2014. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, 242p.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua),(2014b). Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. Edición 2014. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, 345p.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua),(2015a). Estadísticas del Agua en México. Edición 2015. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, 298p.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua),(2015b). Proyectos Estratégicos. Agua potable / Drenaje / Saneamiento. Disponible en:

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SeguimientoPNI.pdf>

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), (2016a). Respuesta a la Solicitud de Información Dirigida a el Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), (2016b). 34 años de operación del Sistema Cutzamala. Disponible en:

<https://www.gob.mx/conagua/articulos/34-anos-de-operacion-del-sistema-cutzamala?idiom=es>

CONAGUA-SEMARNAT (Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales),(2014). Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Diciembre 2014. Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, 308p.

CONAGUA-SEMARNAT (Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales),(2015). Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Diciembre 2015. Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, 282p.

CONAPO (Consejo Nacional de Población),(2017). Estimaciones y Proyecciones de la Población por Entidad Federativa. Disponible en: http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones_Datos

da Cunha J.M.P. y Rodríguez Vignoli J., (2009). Crecimiento urbano y movilidad en América Latina Revista Latinoamericana de Población, vol. 3, núm. 4-5, enero-diciembre, 2009, pp. 27-64 Asociación Latinoamericana de Población Buenos Aires, Organismo Internacional.

Dautant R., (2016). El Uso Seguro del Agua Residual Tratada: Aspecto Fundamental en la Nueva Cultura del Agua. En: Pilar Tello Espinoza, Petia Mijailova y Rolando Chamy Eds. Uso seguro del agua para el reúso. Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS) /en Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO)/ Programa Hidrológico Internacional en América Latina y el Caribe (UNESCO PHI-LAC). 280p. Disponible en:

http://www.aidisnet.org/PDF/AIDIS-Uso_seguro_del_agua_26_sep.pdf

de Haas D., Lane J. y Lant P.,(2011). Life Cycle Assessment of the Gold Coast Urban Water System. Achieving a balance between opposing environmental impacts is a challenge. Water Resources, December 2011, 1-11.

de la Peña M.E., Ducci J. y Zamora V., (2013). Tratamiento de Aguas Residuales en México. Banco Interamericano de Desarrollo. 42p. Disponible en: <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/5931/Tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20en%20M%C3%A9xico.pdf?sequence=4>

Downs T.J., Cifuentes-García E. y Suffet I.M., (1999). Risk Screening for Exposure to Groundwater Pollution in a Wastewater Irrigation District of the Mexico City Region. Environmental Health Perspectives. Vol. 107, No. 7 (Jul., 1999), pp. 553-561

DWUA (Demographia World Urban Areas), (2015). Built-Up Urban Areas or Urban Agglomerations. 11th Annual Edition: January 2015. 135p.

EPRI (Electric Power Research Institute) ,(2002). Water and Sustainability (Volume 4): U.S. Electricity Consumption for Water Supply and Treatment – The Next Half Century. Technical Report. Palo Alto, CA, EPRI.

Escolero O., Kralisch S., Martínez S.E. y Perevochtchikova M., (2016). Diagnóstico de los factores que influyen en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol.68, No.3. pp.409-427.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), (2015). Status of the World's Soil Resources – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy, 602p. Farrell AE.,(2015). Learning to see the invisible: Discovery and Measurement of Ozone. Environmental Monitoring and Assessment. 106:59-80.

FCCT (Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC),(2012). Diagnóstico del agua en las Américas. Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC. México, 448p.

Fernández-Esparza A., (2010). Gestión del Agua en la Cuenca del Valle de México. Disponible en: http://www.riob.org/IMG/pdf/ANTONIO_FERNANDEZ_ESPARZA.pdf

Florescano E., Moreno Toscano A., Cisneros A., Aguirre C. y Terán Y., (1983). Atlas Histórico de México. Siglo XXI Editores. México, 222p.

FMVM (Fondo Metropolitano del Valle de México),(2011). Programa de Ordenación de la Zona Metropolitana del Valle de México. Actualización 2011. Versión Preliminar. Programa Universitario de Estudios Sobre la Ciudad, Coordinación de Humanidades, Universidad Nacional Autónoma de México. México, 440p.

Friedrich E., Pillay S. y Buckley CA., (2009a). Environmental life cycle assessments for water treatment processes – A South African case study of an urban water cycle. Water SA Vol. 35 No. 1 January 2009. Disponible en: <http://www.wrc.org.za>.

Friedrich E., Pillay S. y Buckley CA., (2009b). Carbon footprint analysis for increasing water supply and Sanitation in South Africa: a case study. *Journal of Cleaner production*. 17:1-12.

Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland, 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Garza Villarreal G. (2002). Evolución de las Ciudades Mexicanas en el Siglo XX. *Revista de Información y Análisis*. 19: 7-16.

GDF (Gobierno del Distrito Federal), (2012). Programa de Ordenación de la Zona Metropolitana del Valle de México. Actualización 2012. Síntesis ejecutiva. Gobierno del Distrito Federal, Gobierno del Estado de México y Gobierno del Estado de Hidalgo. México, 53p.

GDF (Gobierno del Distrito Federal), (2016). Áreas Naturales Protegidas del Distrito Federal 2009. Disponible en: http://www.transparenciamedioambiente.df.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=209%3Aareas-naturales-protegidas-del-distrito-federal-2009&catid=70%3Aproblematica-ambiental&Itemid=449

Gobierno de la Ciudad de México, (2016). Cuidar el agua es cosa de tod@s. Disponible en: <http://www.cuidarelagua.cdmx.gob.mx/>

Goedkoop M., Heijuns R., Huijbregts M., De Schryver A., Struijs J. y Van Zemel J.,(2009). ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. 1ª Edición. Ruimte en Milieu, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. Disponible en: www.vrom.nl

Goedkoop M., Heijuns R., Huijbregts M., De Schryver A., Struijs J. y Van Zemel J.,(2013). ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. 1ª Edición (Versión 1.08). Ruimte en Milieu, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. Disponible en: https://www.pre-sustainability.com/download/ReCiPe_main_report_MAY_2013.pdf

González Reynoso A.E., Hernández Muñoz L., Perló Cohen M. y Zamora Saenz I., (2010). De las avenidas de agua a los ríos de asfalto. En: *Rescate de ríos urbanos. Propuestas conceptuales y metodológicas para la restauración y rehabilitación de ríos*. Universidad Nacional Autónoma de México / Coordinación de Humanidades/ Programa Universitario de Estudios Sobre la Ciudad. 112p.

Güerica Hernández L.P., (2006). Desarrollo de una metodología para la valoración en el Análisis del Ciclo de Vida Aplicada a la Gestión integral de residuos municipales. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Güereca PL., Ochoa Sosa R., Gilbert HE. y Suppen Reynaga N., (2015). Life cycle assessment in Mexico: overview of development and implementation. The International Journal of Life Cycle Assessment, March 2015, Volume 20, Issue 3, pp 311-317.

Heijungs R. y Guinée J.B. ,(2012). An Overview of the Life Cycle Assessment Method - Past, Present, and Future. 15-37pp. En: Curran M.A. (Editor).(2012). Life Cycle Assessment Handbook. John Wiley & Sons, Inc. y Scrivener Publishing LLC. USA, 597 p.

Huijbregts M.A.J., Steinmann Z.J.N., Elshout P.M.F., Stam G., Verones F., Zijp M., Hollander A. y van Zelm R. (2016). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. The International Journal of Life Cycle Assessment.

Hernández Padilla F., (2016). Análisis de ciclo de vida como herramienta de decisión para el tratamiento de agua residual en América Latina. Tesis para optar por el grado de Doctor en Ingeniería (Ingeniería Ambiental). Universidad Nacional Autónoma de México, México, 188p.

Hernandez-Padilla F., Margni M. , Noyola A. , Güereca-Hernandez L. y Bulle C. (2017). Assessing wastewater treatment in Latin America and the Caribbean: Enhancing life cycle assessment interpretation by regionalization and impact assessment sensibility. Journal of Cleaner Production. 142. 10.1016/j.jclepro.2016.11.068.

IEA (International Energy Agency), (2010). Las emisiones de CO2 por kWh de electricidad y calor. Disponible en: <http://www.sunearthtools.com/es/tools/CO2-emissions-calculator.php>

IMCO (Instituto Mexicano para la Competitividad),(2010). Acciones urgentes para las ciudades del futuro. Instituto Mexicano para la Competitividad, A.C. México, 289p.

INE (Instituto Nacional de Ecología), (2012). Quinta comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, 441p.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), (2002). INEGI. Estadísticas del Medio Ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana 2002. Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática, México. 52p. Disponible en: www.inegi.gob.mx

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), (2004). Delimitación de las zonas metropolitanas de México. Secretaría de Desarrollo Social, Consejo Nacional de Población e Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática, México. 110p.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), (2012). Delimitación de las zonas metropolitanas de México. Secretaría de Desarrollo Social, Consejo Nacional de Población e Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática, México. 217p.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), (2014). Anuario Estadístico y Geográfico del Distrito federal 2014. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. 473p.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), (2015). Encuesta Nacional de Gastos de los Hogares (ENGASTO) 2013. Disponible en: <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/enchogares/regulares/engasto/2013/default.html>

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), (2016). México en Cifras. Disponible en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=9>

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), (2016a). Monografías. Disponible en: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/poblacion/>

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), (2016b). Anuario estadístico y geográfico de la Ciudad de México 2016. Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática, México. 517p.

Instituto de Ingeniería, (2006). Estudios Hidráulicos e Hidrológicos para Analizar el Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México. Seminario sobre Hidrología e Hidrología Urbana: Desarrollos Recientes. 23 de mayo de 2006. Disponible en: <http://slideplayer.es/slide/1721140/>

Iracheta-Cenecorta A., (2003). Gobernabilidad en la Zona Metropolitana del Valle de México. Papeles de Población, Universidad Autónoma del Estado de México. vol. 9, núm. 36, abril-junio, 2003, pp. 211-239.

Jeong F., Minne E. y Crittenden JC., (2015). Life cycle assessment of the City of Atlanta, Georgia's centralized water system. Int J Life Cycle Assess. June 2015, Volume 20, Issue 6, pp 880-891.

Joshi S., (2000). Product Environmental Life-Cycle Assesment Using Input-Output Techniques. Journal of Industrial Ecology. Vol. 3, Numero 2 y 3. 95-120 pp.

Jouravlev A. ,(2004). Los servicios de agua potable y saneamiento en el umbral del siglo XXI. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Serie Recursos Naturales e Infraestructura. 70p.

Klinglmair M., Sala S. y Brandão M.,(2014). Assessing resource depletion in LCA: a review of methods and methodological issues. Int J Life Cycle Assess. 19: 580-592.

Klöpffer W., (2006). The Role of SETAC in the Development of LCA. International Journal of Life Cycle Assesment. 11(Suppl 1). 116-122 pp.

LAN (Ley de Aguas Nacionales),(2014). Diario Oficial de la Federación. 11/08/2014.

Lane JL., de Haas DW. y Lant PA., (2015). The diverse environmental burden of city-scale urban water systems. Water research 81(2015) 398-415.

LADF (Ley de Aguas del Distrito federal),(2008). Gaceta Oficial del Distrito Federal. 01/10/2008

LAEM (Ley de Agua del Estado de México y Municipios),(2015). Gaceta de Gobierno. 27/07/2015

Lassaux S., Renzoni R. y Germain A., (2001) Life cycle assessment of the anthropic water cycled part 1 waste water treatment plants. 9th SETAC LCA Case Studies Symposium, Noordwijkerhout, the Netherlands, 2001.

León Suematsu G., (1995). Impacto ambiental de los proyectos de uso de aguas residuales CEPIS/OPS. Proceedings. X Conferencia del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 1995. Organización Panamericana de la Salud. 6p. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsair/e/repindex/rep84/vleh/fulltext/acrobat/leon5.pdf>

Lesser-Carrillo, L.E., Lesser-Illades J.M., Arellano-Islas S. y González-Posadas D., (2011). Balance Hídrico y Calidad del Agua Subterránea en el acuífero del Valle del Mezquital, México central. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. Vol. 28, No. 3.

Limón – Macías JG., (2013). Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso?. Trabajo de Ingreso a la Academia de Ingeniería de México. 43p. Disponible en: http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_gualberto_limon_trabajo_de_ingreso.pdf

LGEEPA (Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente),(2015). LEY GENERAL DE EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE. Diario Oficial de la Federación. 09/01/2015.

Manahan SE., (2007). Introducción a la química ambiental. Reverté Ediciones, S.A. de C.V./Universidad Nacional Autónoma de México. México, 725p.

MEA (Millennium Ecosystem Assessment). (2005). Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends. Washington, DC, Island Press.

Miró, C.,(2009).La Demografía en el Siglo XXI en América Latina. Cuadernos de Pensamiento Crítico Latinoamericano. Número 22. Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales. 4p.

Moeller Ch. G.E., Guillén R.A., Treviño L.G. y Lizama Ch., (2016). Reúso de aguas residuales tratadas como fuente directa e indirecta de agua potable. En: Pilar Tello Espinoza, Petia Mijailova y Rolando Chamy Eds. Uso seguro del agua para el reúso. Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS) /en Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO)/ Programa Hidrológico Internacional en América Latina y el Caribe (UNESCO PHI-LAC). 280p. Disponible en: http://www.aidisnet.org/PDF/AIDIS-Uso_seguro_del_agua_26_sep.pdf

Mohamed Mahgoub M.E. , van der Steen N.P., Abu-Zeid K. y Vairavamoorthy K., (2010).Towards sustainability in urban water: a life cycle analysis of the urban water system of Alexandria City, Egypt. Journal of Cleaner Production 18 (2010) 1100–1106.

Monteiro T. y Alcayhuaman R., (2016). Plan de Seguridad de Saneamiento: Fundamentos y perspectivas de implementación. En: Pilar Tello Espinoza, Petia Mijailova y Rolando Chamy Eds. Uso seguro del agua para el reúso. Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS) /en Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO)/ Programa Hidrológico Internacional en América Latina y el Caribe (UNESCO PHI-LAC). 280p. Disponible en: http://www.aidisnet.org/PDF/AIDIS-Uso_seguro_del_agua_26_sep.pdf

Morales-Casique E., Escolero O.A. y Arce J.L. (2014). Resultados del pozo San Lorenzo Tezonco y sus implicaciones en el entendimiento de la hidrogeología regional de la cuenca de México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 31(1): 64-75

Morales-Pinzón T., Angrill S., Rieradevall J., Gabarrell X., Gasol C.M. y Josa A., (2011). LCM of Rainwater Harvesting Systems in Emerging Neighbourhoods in Colombia. En: Towards Life Cycle Sustainability Management. Springer, Heidelberg, Alemania. 277-288p

Nair S., Goerge B, Malano H.M., Arora M. y Nawarathana B., (2014). Water–energy–greenhouse gas nexus of urban water systems: Review of concepts, state-of-art and methods. Resources, Conservation and Recycling 89 (2014): 1–10.

NOM-127-SSA1-1994, (2000). Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización. Diario oficial de la Federación. Miércoles 22 de noviembre de 2000.

Noyola A., Morgan-Sagastume J.M. y Güereca L.P. ,(2016). Selección de Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. Guía de Apoyo para Ciudades Pequeñas y Medianas. Universidad Nacional Autónoma de México. 146p.

Noyola A., Paredes M.G., Morgan-Sagastume J.M. y Güereca L.P. ,(2016). Reduction of Greenhouse Gas Emissions From Municipal Wastewater Treatment in Mexico Based on Technology Selection. CLEAN Soil Air Water, 44(9), pp. 1091-1098. Núñez M., Oliver-Solá J., Rieradevall J. y Gabarrell X., (2010). Water Management in Integrated Service Systems: Accounting for Water Flows in Urban Areas. Water Resources Management, 24(8), pp. 1583-1604.

Núñez García A.L. ,(2015). Caracterización de la problemática de las aguas residuales en Ixmiquilpan Hidalgo. Tesis para optar por el título de Licenciada en Geografía Humana. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, México. 95p.

OMS (Organización Mundial de la Salud), (2005). Ecosistemas y Bienestar Humano. Síntesis sobre salud. Un informe de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, Organización Mundial de la Salud. 64p.

Ontiveros-Capurata R.E., Diakite-Diakite L., Álvarez-Sánchez M.E. y Coras-Merino P.M., (2013). Evaluación de aguas residuales de la ciudad de México utilizadas para riego. Tecnología y Ciencias del Agua, vol. IV, núm. 4, septiembre-octubre, 2013, pp. 127-140 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Morelos, México

ONU (Organización de las Naciones Unidas),(2014). La situación demográfica en el mundo. Informe conciso. Organización de las Naciones Unidas, Nueva York, E.U.A. 31p.

ONU-Hábitat (Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos),(2012). Estado de las ciudades de América Latina y el Caribe 2012. Rumbo a una nueva transición urbana. Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos, ONU-Hábitat, Brasil. 196p.

Ortiz-rodriguez O., Villamizar R. y García-Cáceres R. (2016). Life cycle assessment of four potable water treatment plants in northeastern Colombia. Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science. 11. 10.4136/ambi-agua.1759.

Oswald-Spring U., (2011). Aquatic systems and water security in the Metropolitan Valley of Mexico City. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 3: 497-505.

PAOT (Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F.),(2010a).OCUPACIÓN IRREGULAR Y RESGO SOCIO-AMBIENTAL EN BARRANCAS DE LA DELEGACIÓN ÁLVARO OBREGÓN , DISTRITO FEDERAL. Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F., México, 71p.

PAOT (Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F.),(2010b).OCUPACIÓN IRREGULAR Y RESGO SOCIO-AMBIENTAL EN BARRANCAS DE LA DELEGACIÓN CUAJIMALPA, DISTRITO FEDERAL. Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F., México, 74p.

Pasqualino, J.C., Meneses M., Abella M. y Castells, F., (2009). LCA as a decision support tool for the environment of the operation of a municipal wastewater treatment plant. ssesment of Urban Wastewater Reclamation and Reuse Alternatives. *Environmental Science and Technology*, 43 (9), pp. 3300-3307.

Pasqualino, J.C., Meneses M. y Castells, F., (2011).Life Cycle Assessment of Urban Wastewater Reclamation and Reuse Alternatives. *Journal of Industrial Ecology*, 15 (1), 49-63.

Petit-Boix A., Sanjuan-Delmás D., Gasol C.M., Villalba G., Suárez-Ojeda M.E., Gabarrel X., Josa A. y Rieradevall J., (2014). Environmental Assessment of Sewer Construction in Small to Medium Sized Cities Using Life Cycle Assessment. *Water Resources management*. Marzo 2014, Vol. 28, No. 4, pp 979-997.

Petit-Boix A., Sanjuan-Delmás D., Chenel S., Mirín D., Gasol C.M., Farreny R., Villalba G., Suárez-Ojeda M.E., Gabarrel X., Josa A. y Rieradevall J., (2015). Assessing the Energetic and Environmental Impacts of the Operation and Maintenance of Spanish Sewer Networks from a Life-Cycle Perspective. *Water Resources Management*. Junio 2015, Vol. 29, No. 8, pp 2581-2597

PNH (Programa Nacional Hídrico).(2014). Programa Nacional Hídrico 2014-2018. Gobierno de la República. México, 142 p.

PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente),(2006). Manual del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la Capa de Ozono. Séptima Edición. Secretaría del Ozono, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Nairobi, Kenya, 518 p.

Presidencia de la República (2017). Sistema de Pozos Profundos en la Ciudad de México. Presidencia de la República. Disponible en:

<https://www.gob.mx/presidencia/articulos/sistema-de-pozos-profundos-en-la-cdmx?idiom=es>

Rana L . , Dhankhar R . y Chhikara S.,(2010). Soil characteristics affected by long term application of sewage wastewater. *International Journal of Environmental Research*, 4(3): 513-518.

SACM (Sistema de Aguas de la Ciudad de México),(2010). MANUAL ADMINISTRATIVO EN SU PARTE CORRESPONDIENTE A ORGANIZACIÓN DEL SISTEMA DE AGUAS DE LA CIUDAD DE MÉXICO. Gaceta Oficial del Distrito Federal (28 de mayo de 2010). Disponible en:

<http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/3247.htm>

SACM (Sistema de Aguas de la Ciudad de México),(2012). El Gran Reto del Agua en la Ciudad de México. Sistema de Aguas de la Ciudad de México, México. 192p. Disponible en: http://laopiniondelaciudad.mx/wp-content/uploads/2016/02/ElGranRetodelAgua_enla_CiudadMexico.pdf

SACM (Sistema de Aguas de la Ciudad de México),(2015). Sitio Web Oficial del Sistema de Aguas de la Ciudad de México: <http://www.sacmex.df.gob.mx/sacmex/>

SACM (Sistema de Aguas de la Ciudad de México), (2016). Respuesta a la Solicitud de Información Dirigida a la Dirección General del Sistema de Aguas de la Ciudad de México.

SACM (Sistema de Aguas de la Ciudad de México), (2016b). El Gran Reto del Agua en la Ciudad de México. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. 192p. Disponible en: http://laopiniondelaciudad.mx/wp-content/uploads/2016/02/ElGranRetodelAgua_enla_CiudadMexico.pdf

Sanjuan-Delmás D., Petit-Boix A., Gasol C., Villalba G., Suárez-Ojeda M.E., Gabarrell X., Josa A. y Rieradevall J., (2014). Environmental Assessment of different pipelines for drinking water transport and distribution network in small to medium cities: a case from Betanzos, Spain. Journal of Cleaner Production 66: 588-598.

Schakel W., Meerman H., Talaei A., Ramírez A y Faaij A. (2014). Comparative life cycle assessment of biomass co-firing plants with carbon capture and storage. Applied Energy 131:441-467.

SEMARNAT-CONAGUA (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Comisión Nacional del Agua),(2014). Beneficios de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F. 20p.

SENER (Secretaría de Energía), (2016). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional. 2016-2030. PRODESEN. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/98308/PRODESEN-2016-2030_1.pdf

Shiao T., Gassert F y Witkowski K., (2014). Latin American Experts Need Good Data to Plan for Water Stress and a Changing Climate. Report. Johns Hopkins Water Magazine. Disponible en: <http://water.jhu.edu/magazine/latin-american-experts-need-good-data-to-plan-for-water-stress-and-a-changi>

Soderberg C.A.P., (2016). Panorama mundial del reúso de aguas residuales tratadas. En: Pilar Tello Espinoza, Petia Mijailova y Rolando Chamy Eds. Uso seguro del agua para el reúso. Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS) /en Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO)/ Programa Hidrológico Internacional en América Latina y el Caribe (UNESCO PHI-LAC). 280p. Disponible en: http://www.aidisnet.org/PDF/AIDIS-Uso_seguro_del_agua_26_sep.pdf

Stranddorf H.K., Hoffman L. y Schmidt A., (2005). Impact categories, normalization and weighting in LCA. Environmental News No. 78. Danish Ministry of Environment, Environmental Protection Agency. Disponible en: <http://www2.mst.dk/udgiv/publications/2005/87-7614-574-3/pdf/87-7614-575-1.pdf>

Svarc-Gajic J. ,(2009). General Toxicology. Nova Science Publishers Inc, New York, USA., 299 p.

The Royal Society., (2008). Ground-level ozone in 21st Century: Future, trends, impacts and policy implications. Science Policy Report. 15/08.

Torres Bernardino L. ,(2014). Sistema Lerma. Una Visión Política en la Gestión Pública del Agua, ¿solución Estatal o Federal?. Instituto de Administración Pública del Estado de México, A.C. 290p.

Transparencia DF, (2008). Información útil a tu alcance sobre medio ambiente. Disponible en: http://www.transparenciamedioambiente.df.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=132%3Aabastecimiento&catid=57%3Aimpactos-en-la-vida-cotidiana&Itemid=415

Trejo Morales C.M., Echeverría Villagómez S., Malagón Díaz J. , Patiño Peña F.J., Montoya Ayala A., (2004) ASEGURAMIENTO METROLÓGICO DE LA PLANTA POTABILIZADORA DE AGUA DEL SISTEMA CUTZAMALA, COMISIÓN NACIONAL DE AGUA. Simposio de Metrología 2004. Disponible en: <https://www.cenam.mx/simposio2004/memorias/TA-068.pdf>

UNEP (United Nations Environment Programme),(2010). Latin America and the Caribbean: Environment Outlook. United Nations Environment Programme. Panamá, 49p.

UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) ,(2012). The United Nations World Water Development Report 4. Managing Water Under Uncertainty and Risk. Volume 1. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. 900p.

UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization), (2015). The United Nations World Water Development Report. Water for a Sustainable World. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. 139p.

UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación ,la Ciencia y la Cultura) ,(2015b). Aguas residuales. El recurso desaprovechado. Informe Mundial de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Organización de las Naciones Unidas para la Educación ,la Ciencia y la Cultura. 202p. Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002476/247647S.pdf>

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change),(1995). The Science of Climate Change: Summary of the Working Group I Report.

Valek A.M., Susnik J. y Grafakos S., (2017) Quantification of the urban water-energy nexus in México City, México, with an assessment of water-system related carbon emissions. Sci Total Environ. 2017 Jul 15;590-591:258-268.

Van Zelm R., Huijbregts M. y Van de meent, D., (2009). USES-LCA 2.0—a global nested multi-media fate, exposure, and effects model. International Journal of Life Cycle Assessment. 14. 282-284.

Viejo Zubicaray M., (2000). Bombas. Teoría, Diseño y Aplicaciones. Editorial Limusa S.A. de C.V., México. 262p.

WEF (World Economic Forum), (2009). Energy Vision Update 2009. Thirsty Energy: Water and Energy in the 21st Century. World Economic Forum. Disponible en: <http://www3.weforum.org>
WHO (World Health Organization),(2011). "Guidelines for drinking-water quality, 4th ed". Disponible en: http://whqlibdoc.who.int/publications/2011/9789241548151_eng.pdf

WHO-UNICEF (World Health Organization- United Nations International Children's Emergency Fund), (2014). Progress on Drinking Water and Sanitation. 2014 Update. World Health Organization y United Nations International Children's Emergency Fund. Suiza, 78p.

World Population Review, (2017). Mexico City Population. (2017-10-20). Retrieved 2017-11-10, from <http://worldpopulationreview.com//>

ANEXO I. -Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)

Planta	Delegación	Capacidad Instalada / Caudal Tratado (L/s)	Proceso
El Rosario	Azcapotzalco	25.0 / 14.0	Terciario
Ciudad Universitaria "FCPS"	Coyoacán	7.5 / 0.8	Lodos Activados
Coyoacán	Coyoacán	250.0 / 179.0	Lodos Activados
Ciudad Universitaria	Coyoacán	60.0 / 30.0	Lodos Activados
San Juan de Aragón	Gustavo A. Madero	500.0 / 269.0	Lodos Activados
Acueducto de Guadalupe	Gustavo A. Madero	110.0 / 59.0	Lodos Activados
Cd. Deportiva	Iztacalco	230.0 / 93.0	Lodos Activados
Iztacalco	Iztacalco	13.0 / 13.0	Lodos Activados
Cerro de la Estrella	Iztapalapa	3000 / 2188	Lodos Activados
Santa Martha Acatitla	Iztapalapa	14.0 / 21.0	Lodos Activados
Magdalena Contreras	La Magdalena Contreras	50.0 / 25.0	Lodos Activados
San Pedro Atocpan	Milpa Alta	60.0 / 35.0	Lodos Activados
Santa Fe	Álvaro Obregón	280.0 / 70.0	Lodos Activados
San Andrés Mixquic	Tláhuac	30.0 / 22.0	Primario Avanzado
San Juan Ixtayopan (La Lupita)	Tláhuac	15.0 / 15.0	Lodos Activados
El Llano	Tláhuac	250.0 / 13.0	Lodos Activados
Tetelco	Tláhuac	15.0 / 10.0	Lodos Activados
San Lorenzo	Tláhuac	225.0 / 85.0	Lodos Activados

Parres	Tlalpan	7.5 / 3.0	Lodos Activados
H. Colegio Militar	Tlalpan	30.0 / 26.0	Lodos Activados
Abasolo	Tlalpan	15.0 / 5.0	Lodos Activados
San Miguel Xicalco	Tlalpan	7.5 / 7.0	Lodos Activados
U. H. Pemex Picacho	Tlalpan	13.0 / 13.0	Lodos Activados
Tlatelolco	Cuauhtémoc	22.0 / 16.0	Lodos Activados
Bosques de las Lomas	Miguel Hidalgo	25.0 / 23.0	Lodos Activados
Chapultepec	Miguel Hidalgo	160.0 / 74.0	Lodos Activados
Campo Militar 1-A	Miguel Hidalgo	30.0 / 30.0	Lodos Activados
Reclusorio Sur	Xochimilco	30.0 / 10.0	Lodos Activados
San Luis Tlaxialtemalco	Xochimilco	150.0 / 73.0	Lodos Activados

Fuente: Elaboración propia son base en CONAGUA (2015) y SACM (2016)

ANEXO II. Relación de Visitas a las Instalaciones Operadas por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México y la Comisión Nacional del Agua

Fecha	Instalación	Etapa
26 de septiembre del 2016	Planta de bombeo y tanque de almacenamiento “El Cartero”	Distribución
27 de septiembre del 2016	Planta potabilizadora “Río Magdalena I”	Captación y Potabilización
28 de septiembre del 2016	Tanque de almacenamiento “Zaragoza”	Distribución
29 de septiembre del 2016	Planta de bombeo de agua potable “Peñón Viejo”	Distribución
30 de septiembre del 2016	Planta potabilizadora “Acueducto Tláhuac – La Caldera”	Potabilización
3 de octubre del 2016	Planta de tratamiento de aguas residuales “Cerro de la Estrella”	Tratamiento y Reúso
8 de octubre del 2016	Planta de rebombeo de aguas residuales “Renovación”	Recolección
10 de octubre del 2016	Planta de rebombeo de aguas residuales “El Salado”	Recolección y Vertido en el Cuerpo Receptor
15 de octubre del 2016	Planta potabilizadora “Río Magdalena II”	Potabilización y Distribución
17 de octubre del 2016	Planta de bombeo de agua potable “La Estrella”	Captación ¹² y Distribución

¹² La instalación cuenta con un pozo propio, además de rebompear caudales provenientes de otras fuentes.

16 de febrero de 2017	Planta potabilizadora “Los Berros” (Sistema Cutzamala)	Potabilización
16 de febrero de 2017	Planta de bombeo 6 del Sistema Cutzamala	Transporte
16 de febrero de 2017	Residencia general de operación del Sistema Cutzamala	Operaciones de control y supervisión

ANEXO III. Información Utilizada y Procedimientos de Cálculo para Obtener el Consumo de Energía Eléctrica del Sistema de Gestión Hídrica de la Ciudad de México

ETAPA	INFORMACIÓN UTILIZADA	PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO
Captación	<p>-455 datos de facturación de energía eléctrica (tarifa 6) y volumen extraído de pozos operados por el SACM, correspondientes al año 2015¹</p> <p>-Datos de facturación de energía eléctrica del año 2015 para servicios menores de las presas que componen el sistema Cutzamala²</p>	<p>-Obtención del total de kWh/mes y de los m³/s bombeados, para calcular, con base en eso, los kWh/s y finalmente los kWh/m³</p>
Transporte	<p>-Datos de consumo de energía eléctrica (kWh/m³) del año 2015 correspondiente a las dos plantas de bombeo del sistema Chiconautla que bombean agua hacia la CDMX³</p> <p>-Datos de facturación de energía eléctrica y volumen bombeado del año 2015 para las 6 plantas de bombeo que componen el Sistema Cutzamala⁴</p>	<p>-Obtención del total de kWh/mes y de los m³/s bombeados, para calcular, con base en eso, los kWh/s y finalmente los kWh/m³</p>
Potabilización	<p>-Valor promedio de consumo energético (kWh/m³) considerando 48 plantas potabilizadoras operadas por el SACM que se encontraban en funcionamiento durante 2015⁵</p>	<p>-No se realizó cálculo alguno, ya que el SACM proporcionó el valor necesario.</p>

^{1,3,5} Información proporcionada por la Dirección Ejecutiva de Operación del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, como respuesta a la solicitud de información realizada el 10 de noviembre de 2016.

^{2,4} Información proporcionada por el ORGANISMO DE CUENCA AGUAS DEL VALLE DE MEXICO-RESIDENCIA GENERAL DE OPERACIÓN DEL SISTEMA CUTZAMALA durante la visita a las instalaciones el 16 de febrero de 2017.

<p>Distribución</p>	<p>-104 datos de facturación de energía eléctrica (tarifa 6) y volumen transportado correspondiente a 6 instalaciones de bombeo de agua potable (Chalmita, La Estrella, Xotepingo, Quetzalcóatl, La Caldera y El Cartero) dentro de la CDMX operadas por el SACM, correspondiente al año 2015⁶</p>	<p>-Obtención del total de kWh/mes y de los m³/s bombeados, para calcular, con base en eso, los kWh/s y finalmente los kWh/m³</p>
<p>Uso</p>	<p>-Se considera la operación de una bomba eléctrica, de uso doméstico, con una potencia de ¼ hp, con bombeo de agua a una altura de 3 niveles. Se consideran los siguientes parámetros de operación:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Altura máxima de bombeo: 16m -Flujo máximo: 70 l/min -Flujo real: 40 l/min -Consumo de energía: 0.1865 kw 	<p>-Obtención del tiempo necesario para bombear 1m³ de agua:</p> $\frac{1000 \text{ L}}{40 \text{ L/min}} = 25 \text{ min}$ $\frac{25 \text{ min}}{60 \text{ min}} = 0.416 \text{ h}$ <p>-Obtención del consumo en términos de kWh/m³:</p> $\frac{(0.1865 \text{ kw}) * (0.4166 \text{ h})}{1 \text{ m}^3} = 0.077 \text{ kwh/m}^3$ <p>-Obtención del valor utilizado en la modelación considerando que solamente el 23.45% de los hogares en la CDMX cuentan con bomba y tinaco⁷:</p> $(0.077 \text{ kwh/m}^3)(0.2345) = 0.018 \text{ kwh/m}^3$

⁶ Información proporcionada por la Dirección Ejecutiva de Operación del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, como respuesta a la solicitud de información realizada el 10 de noviembre de 2016.

⁷INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), (2015). Encuesta Nacional de Gastos de los Hogares (ENGASTO) 2013. Disponible en: <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/enchogares/regulares/engasto/2013/default.html>

Recolección	<p>-Valor promedio del consumo mensual de energía eléctrica (kWh) reportado para 106 instalaciones de bombeo de aguas residuales que dan servicio a la CDMX, operadas por el SACM. La información corresponde a valores de consumo de 2015 de instalaciones situadas en 13 alcaldías de la CDMX (Venustiano Carranza, Gustavo A. Madero, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Azcapotzalco, Iztapalapa, Iztacalco, Álvaro Obregón, Tláhuac, Benito Juárez, Coyoacán, Tlalpan y Xochimilco) y 4 municipios del Estado de México (Ecatepec, Tlalnepantla, Naucalpan, Nezahualcóyotl).⁷</p>	<p>-No se realizó cálculo alguno, ya que el SACM proporcionó el valor necesario.</p>
Tratamiento	<p>-73 valores del consumo mensual de energía eléctrica (kWh/mes) reportado para 9 PTAR (Mixquic, Parres, Iztacalco, Santa Martha, Atocpan, Santa Fé, Tlatelolco, Bosques de las Lomas y Reclusorio Sur) que dan servicio a la CDMX, operadas por el SACMX. La información corresponde a valores de consumo de 2015.⁸</p> <p>-9 valores del caudal tratado mensualmente (m³/mes) para 9 PTAR (Mixquic, Parres, Iztacalco, Santa Martha, Atocpan, Santa Fé, Tlatelolco, Bosques de las Lomas y Reclusorio Sur) que dan servicio a la CDMX, operadas por el SACMX. La información corresponde a valores de consumo de 2015.⁹</p>	<p>-Obtención del promedio de los 73 valores del consumo mensual de energía eléctrica (kWh/mes).</p> <p>-Obtención del promedio de los 9 valores del caudal tratado mensualmente (m³/mes).</p> <p>-Cálculo del cociente del promedio mensual de consumo de energía eléctrica (kWh/mes) entre el caudal promedio de agua tratada (m³/mes) por las 9 PTAR señaladas, para obtener el total de consumo energético (kWh/m³).</p>

^{7,8,9} Información proporcionada por la Dirección Ejecutiva de Operación del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, como respuesta a la solicitud de información realizada el 10 de noviembre de 2016.

Reúso	-En vista de que el SACM no reportó información específica para este rubro, se utilizó el valor de correspondiente a la etapa de distribución.	-No se realizó cálculo alguno.
Vertido en el cuerpo receptor	-En vista de que el SACM no reportó información específica para este rubro, se utilizó el valor de correspondiente a la etapa de recolección.	-No se realizó cálculo alguno.

ANEXO IV. Cálculo de los valores utilizados en el inventario para la etapa de Recolección.

a) Consumo de energía de bombas que operan con diesel.

Con base en la información proporcionada por el SACM¹, el 10% de las aguas residuales en la CDMX se bombean utilizando equipos que operan con diesel, que tienen una potencia de 947 hp, con una capacidad de 2m³/s y un consumo de combustible de 70 L/h, tenemos lo siguiente:

Las bombas operan con una potencia de 947hph (caballos de fuerza por hora). Sabemos que 1hph = 0.744713Kwh, entonces:

$$947hph = (0.744713Kwh)(947) = 705.243Kwh$$

Ahora, como sabemos que el equipo desaloja 2m³ / s, tenemos que en una hora desalojará:

$$(2m^3 / s)(3,600s) = 7,200m^3$$

Considerando la información anterior y que solamente el 10% del agua en la etapa de Recogida se bombea con equipos que operan con diesel para la CDMX, tenemos que:

$$\left(\frac{705.243Kwh}{7,200m^3} \right) (0.10) = 9.79 \times 10^{-3} Kwh / m^3 \approx 0.009Kwh / m^3, \text{ que es el valor utilizado.}$$

b) Reactivo utilizado.

En las instalaciones que realizan procesos que forman parte de la etapa de Recolección se utiliza regularmente el producto con marca comercial Bioxiclean®, el cual es un bio oxidante

¹ Información proporcionada por la Dirección Ejecutiva de Operación del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, como respuesta a la solicitud de información realizada el 10 de noviembre de 2016.

orgánico. En vista de que el único componente que se muestra en la etiqueta es el lauril sulfato de sodio, se considera en una concentración de 10% para los cálculos siguientes.

Con base en la información proporcionada por el SACM², en una instalación que opera con una capacidad de 20m³/s, se utilizan dos contenedores de 20 litros cada uno de Bioxiclean® por hora, entonces tenemos que:

Al ser una solución al 10% de lauril sulfato de sodio (LSDS) en el producto comercial Bioxiclean, cada hora se consumirán 4kg LSDS por hora.

Como sabemos que la planta opera con un caudal de 20m³ / s, entonces tenemos que:

$(20m^3 / s)(3,600s) = 72,000m^3 / h \Rightarrow 72,000,000L / h$, entonces tendremos que se usan:

$$\left(\frac{4kg / h}{72,000,000L / h} \right) = 5.55 \times 10^{-8} kg / L \approx 5.55 \times 10^{-5} kg / m^3 \approx 0.055 g / m^3 \approx 55.5 mg / m^3$$

Por lo tanto, tenemos que se utiliza una concentración aproximada de LSDS de 5.55mg / m³, que es el valor utilizado.

c) Emisiones al Aire.

Con base en Noyola *et al.* (2018)³ que reportan un factor de corrección de metano de 0.06 para las aguas residuales, a el IPCC (2006)⁴ que indica que la capacidad máxima de

² Información proporcionada por la Dirección Ejecutiva de Operación del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, como respuesta a la solicitud de información realizada el 10 de noviembre de 2016.

³ Noyola A., Paredes M.G., Güereca L.P., Molina L.T. y Zavala M., (2018). Methane correction factors from aerobic wastewater treatment facilities based on field data in Mexico and on literature review. *Science of the Total Environment*, 639: 84-91.

⁴ IPCC, (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5: Waste. Chapter 6: Wastewater Treatment and Discharge. Disponible en: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_6_Ch6_Wastewater.pdf

producción de metano es de 0.6 kg CH₄/ kg DBO , y a que, de acuerdo con Hernández Padilla (2016)⁵ la DBO del agua residual es de 240mg/L, se realizan los siguientes cálculos:

Tenemos que el factor de emisión para la etapa de recogida es de:

$$FE_{\text{Recogida}} = \left(\frac{0.6 \text{ kg } CH_4}{\text{kg } DBO} \right) (0.06) = \frac{0.036 \text{ kg } CH_4}{\text{kg } DBO}$$

Por otro lado, tenemos que con respecto a la DBO:

$$240 \text{ mg } DBO / L = 0.240 \text{ kg } DBO / m^3$$

Entonces, tenemos que:

$$\left(\frac{0.036 \text{ kg } CH_4}{\text{kg } DBO} \right) (0.240 \text{ kg } DBO / m^3) = 0.00864 \text{ kg } CH_4 / m^3 \approx 8.64 \text{ g } CH_4 / m^3$$

∴ El valor utilizado en el inventario es de 8.64g CH₄ / m³.

⁵ Hernández Padilla F., (2016). Análisis de ciclo de vida como herramienta de decisión para el tratamiento de agua residual en América Latina. Tesis para optar por el grado de Doctor en Ingeniería (Ingeniería Ambiental). Universidad Nacional Autónoma de México, México, 188p.

ANEXO V. Cálculo de los valores utilizados en el inventario para la etapa de Tratamiento.

a) Reactivos.

Con base en las consideraciones realizadas en la etapa de Recolección, tenemos que se utilizan $55.55\text{mg}/\text{m}^3$ del producto denominado Bioxiclean®, y en virtud de que solamente el 8% del agua residual recibe tratamiento, tenemos que:

$$(55.5\text{mg} / \text{m}^3)(0.08) = 4.44\text{mg} / \text{m}^3, \text{ que es el valor utilizado.}$$

Para los casos del Hipoclorito de Sodio y el Cloro (gas) solamente se ajustaron las cantidades al 8% requerido para esta etapa, con base en la información proporcionada por el SACM.1

b) Emisiones al Suelo.

Considerando que de acuerdo con lo reportado por Hernández Padilla (2016)², la cantidad de biosólidos producidos es de $261\text{g}/\text{m}^3$ para el tratamiento con lodos activados, se procedió a calcular la cantidad de emisiones al suelo proporcionales al 8%, ya que solamente este porcentaje de aguas residuales es tratado, considerando la composición de lodos del trabajo realizado por Castrejon et al. (2002)³.

¹ Información proporcionada por la Dirección Ejecutiva de Operación del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, como respuesta a la solicitud de información realizada el 10 de noviembre de 2016.

² Hernández Padilla F., (2016). Análisis de ciclo de vida como herramienta de decisión para el tratamiento de agua residual en América Latina. Tesis para optar por el grado de Doctor en Ingeniería (Ingeniería Ambiental). Universidad Nacional Autónoma de México, México, 188p.

³ Castrejón A., Barrios Pérez J.A., Jiménez Cisneros B.E., Maya Rendón C., Rodríguez A. y González A.(2002).Evaluación de la calidad de lodos residuales de México. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente; AIDIS. Memorias. México, D.F., FEMISCA, 2002, p.1-14.

c) Emisiones al aire.

Con base en la información del INE (2013)⁴ que indica que el factor de emisión por el uso del sistema de tratamiento de lodos activados es de 0.24 kg de CH₄ / kg de DBO y a que, de acuerdo con Hernández Padilla (2016)⁵ la DBO del agua residual es de 240mg/L, se realizan los siguientes cálculos:

Con base en el IPCC (2006)⁴ que indica que la capacidad máxima de producción de metano es de 0.6 kg CH₄ / kg DBO y que el factor de corrección de metano es de 0.4 en el límite superior para plantas de tratamiento aerobias centralizadas, sobrecargadas y con manejo inadecuado y a que, de acuerdo con Hernández Padilla (2016)² la DBO del agua residual es de 240mg/L, se realizan los siguientes cálculos:

⁴ IPCC, (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5: Waste. Chapter 6: Wastewater Treatment and Discharge. Disponible en: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_6_Ch6_Wastewater.pdf

Tenemos que el factor de emisión para la etapa de tratamiento por lodos activados es de:

$$FE_{\text{Tratamiento}} = \left(\frac{0.6 \text{ kg } CH_4}{\text{kg } DBO} \right) (0.4) = \frac{0.24 \text{ kg } CH_4}{\text{kg } DBO}$$

Por otro lado, tenemos que con respecto a la *DBO*:

$$240 \text{ mg } DBO / L = 0.240 \text{ kg } DBO / m^3$$

Considerando que el proceso de lodos activados remueve el 85% de la *BDO*, tenemos que el valor a utilizar de *DBO* es el siguiente:

Entonces, tenemos que:

$$(0.240 \text{ kg } DBO / m^3) (0.15) = 0.036 \text{ kg } DBO / m^3$$

Ahora, considerando que solamente el 8% del agua recibe tratamiento, obtenemos que:

$$(0.036 \text{ kg } DBO / m^3) (0.08) = 2.88 \times 10^{-3} \text{ kg } DBO / m^3$$

Finalmente, considerando el factor de emisión, tenemos que:

$$\left(\frac{0.24 \text{ kg } CH_4}{\text{kg } DBO} \right) (2.88 \times 10^{-3} \text{ kg } DBO / m^3) = 6.912 \times 10^{-4} \text{ kg } CH_4 / m^3 \approx 0.6912 \text{ g } CH_4 / m^3 \approx 691.2 \text{ mg } CH_4 / m^3$$

∴ El valor utilizado en el inventario es de $691.2 \text{ mg } CH_4 / m^3$.

ANEXO VI. Cálculo de los valores utilizados en el inventario para la etapa de Vertido en el Cuerpo Receptor.

a) Reactivos.

Con base en las consideraciones realizadas en la etapa de Recolección, tenemos que se utilizan 55.55mg/m³ del producto denominado Bioxiclean®, y en virtud de que el 92% del agua residual permanece sin tratamiento, tenemos que:

$$(55.5\text{mg} / \text{m}^3)(0.92) = 51.06\text{mg} / \text{m}^3, \text{ que es el valor utilizado.}$$

b) Emisiones al aire.

Con base en la información del INE (2013)¹ que indica que el factor de emisión por descarga a cuerpos de agua y alcantarillas es de 0.36 kg de CH₄ / kg de DBO y a que, de acuerdo con Hernández Padilla (2016)²⁴ la DBO del agua residual es de 240mg/L, se realizan los siguientes cálculos:

Con base en el IPCC (2006)¹ que indica que la capacidad máxima de producción de metano es de 0.6 kg CH₄ / kg DBO y que el factor de corrección de metano es de 0.2 en el límite superior para descargas en el mar, ríos y lagos, y a que, de acuerdo con Hernández Padilla (2016)² la DBO del agua residual es de 240mg/L, se realizan los siguientes cálculos:

¹ IPCC, (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5: Waste. Chapter 6: Wastewater Treatment and Discharge. Disponible en: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_6_Ch6_Wastewater.pdf

² Hernández Padilla F., (2016). Análisis de ciclo de vida como herramienta de decisión para el tratamiento de agua residual en América Latina. Tesis para optar por el grado de Doctor en Ingeniería (Ingeniería Ambiental). Universidad Nacional Autónoma de México, México, 188p.

Tenemos que el factor de emisión para la etapa vertido en el cuerpo receptor es de:

$$FE_{\text{Vertido en Cuerpo Receptor}} = \left(\frac{0.6 \text{ kg } CH_4}{\text{kg } DBO} \right) (0.2) = \frac{0.12 \text{ kg } CH_4}{\text{kg } DBO}$$

Por otro lado, tenemos que con respecto a la *DBO*:

$$240 \text{ mg } DBO / L = 0.240 \text{ kg } DBO / m^3$$

Entonces, tenemos que:

$$\left(\frac{0.12 \text{ kg } CH_4}{\text{kg } DBO} \right) (0.240 \text{ kg } DBO / m^3) = 0.0288 \text{ kg } CH_4 / m^3 \approx 28.8 \text{ g } CH_4 / m^3$$

Ahora, considerando que el 92% del agua no recibe tratamiento alguno, obtenemos que:

$$(28.8 \text{ g } CH_4 / m^3) (0.92) = 26.496 \text{ g } CH_4 / m^3$$

∴ El valor utilizado en el inventario es de 26.496g CH_4 / m^3 .