



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL – AGUA

IMPACTO AMBIENTAL DEL MANEJO DE LOS SEDIMENTOS EXTRAÍDOS DE
REDES DE ALCANTARILLADO URBANO

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

Ricardo Zárate Mendoza

TUTOR:

Dr. Enrique César Valdez - Facultad de Ingeniería, UNAM

COMITÉ TUTOR

Dr. Simón González Martínez - Instituto de Ingeniería, UNAM
Dr. Jorge Luis de Victorica Almeida - Instituto de Ingeniería, UNAM

Ciudad Universitaria, C.D.M.X. Enero 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	Dr. Jorge Luis de Victorica Almeida
Secretario:	M. en C. Rolando Salvador García Gómez
1 er. Vocal:	Dr. Arturo Cruz Ojeda
2 do. Vocal:	Dr. Simón González Martínez
3 er. Vocal:	Dr. Enrique César Valdez

Lugar donde se realizó la tesis:

Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Facultad de ingeniería, UNAM

TUTOR DE TESIS:
Dr. Enrique César Valdez

FIRMA

Agradecimientos

Agradezco infinitamente a la Universidad Nacional Autónoma de México por albergarme durante 7 años en los cuales me formó como una persona con conciencia social y ambiental.

El financiamiento otorgado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología para el desarrollo de la presente investigación.

Al Dr. Enrique César Valdez por ser mi maestro, asesor y amigo, y por el apoyo académico y personal que amablemente me brindó en el transcurso de los programas de especialidad y maestría. Sin su confianza, motivación, ejemplo y paciencia, el proceso de elaboración de este trabajo no habría sido tan satisfactorio ni tan enriquecedor.

A mi comité tutorial, Dr. Arturo Cruz Ojeda, Dr. Jorge Luis de Victorica Almeida, M. en C. Rolando Salvador García Gómez y Dr. Simón González Martínez por sus comentarios, atentos y esclarecedores, a cada párrafo del presente trabajo que, sin duda, ayudaron a mejorar el resultado final de la investigación.

A la M. en I. Alba Beatriz Vázquez González, al M. en I. Cristian Emmanuel González Reyes, al M. en I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose por sus sabios consejos en momentos difíciles.

Al Sistema de Aguas de la Ciudad de México por su apoyo técnico y administrativo, agradezco con especial énfasis al Ing. Federico Pedro Pérez Chávez y a la Ing. Patricia Ledezma por el apoyo administrativo durante la recolección de información y muestras, también a los jefes de áreas: Ing. Virgilio Rodas Gutiérrez, Arq. Ricardo Gallegos, Arq. Edmundo Beltrán Jiménez, Ing. José Cruz Puente Medina, Ing. Tomas Flores Tlatelpa, Ing. José Galván Gómez, Ing. Francisco Tijerina, Ing. José Cruz Puente Medina por su valioso tiempo, sus comentarios y su disposición durante la recolección de información y por último pero no menos importantes, agradezco a los operadores de los equipos de desazolve tanto de malacates como de hidroneumáticos a quienes les dedico esta tesis.

A la Subdirección de control de calidad del agua del Sistema de Aguas de la Ciudad de México por la contribución a la investigación mediante el acceso a su información.

Al Dr. René Rosiles Martínez por su aportación en la caracterización de los sedimentos y por sus consejos tan únicos que hicieron levantar mi ánimo más de una vez.

A mi familia por todo su apoyo incondicional en las decisiones en la vida y por todo el amor que me han brindado hasta ahora.

A Angélica por su amor y su compañía en todo momento.

ÍNDICE

Resumen	12
Introducción	14
Objetivo general	15
Objetivos específicos	15
Alcances	15
Capítulo I. Antecedentes	16
1.1. El sistema de alcantarillado de la Ciudad de México	16
1.2. Zonificación de la red de alcantarillado para su mantenimiento	18
1.3. Aspectos operativos y de mantenimiento	19
1.3.1. Desazolve mediante camiones hidroneumáticos	20
1.3.2. Desazolve mediante equipos de malacates	21
1.4. Normatividad mexicana aplicable al manejo de los sedimentos del alcantarillado sanitario	22
1.4.1. NOM-004-SEMARNAT-2002	23
1.4.2. NOM-052-SEMARNAT-2005	24
1.4.3. NOM-161-SEMARNAT-2011	25
1.4.4. NMX-AA-112-1994-SCFI	26
Capítulo II. Marco teórico	27
2.1. Sedimentos	27
2.2. Origen de los sedimentos	31
2.3. Fuentes de contaminación de sedimentos	33
2.4. Efectos de los sedimentos	36
2.4.1. Efectos ambientales	37
2.4.2. Efectos hidráulicos	38
2.5. Transporte de sólidos en alcantarillas	39
2.5.1. Arrastre	39
2.5.2. Transporte	40
2.5.3. Deposición	41
2.5.4. Transporte de lechos de sedimentos	41
2.6. Características de los sólidos	41
2.6.1. Características de los sólidos depositados	42
2.6.2. Características de los sólidos en movimiento	46
Capítulo III. Metodología para la evaluación del impacto ambiental del manejo de los sedimentos extraídos de redes de alcantarillado urbano	48

3.1. Descripción del manejo de sedimentos extraídos de redes de alcantarillado urbano	51
3.2. Descripción del sistema ambiental	52
3.3. Identificación de los efectos ambientales	52
3.4. Selección de indicadores ambientales	55
3.5. Muestreo y pruebas de laboratorio	56
3.5.1. Campaña de muestreo	57
3.5.2. Pruebas de laboratorio	63
3.6. Evaluación de impactos ambientales	64
3.7. Propuesta de medidas de mitigación	66
Capítulo IV. Impacto ambiental del manejo de los sedimentos extraídos de redes de alcantarillado urbano de la Ciudad de México	68
4.1. Descripción del manejo de los sedimentos extraídos de redes de alcantarillado urbano	68
4.1.1. Extracción de sedimentos de la alcantarilla	70
4.1.2. Almacenamiento temporal de sedimentos extraídos	72
4.1.3. Transporte de sedimentos	72
4.1.4. Desección de sedimentos	73
4.1.5. Disposición final de sedimentos	76
4.2. Descripción del sistema ambiental	76
4.3. Identificación de efectos ambientales	77
4.3.1. Cribado de impactos ambientales	79
4.4. Selección de indicadores ambientales	79
4.5. Muestreo y resultados de las pruebas de laboratorio	82
4.6. Evaluación de impactos ambientales	88
4.6.1. Valoración de los elementos ambientales	89
4.6.2. Valoración de impactos ambientales	89
Capítulo V. Medidas de mitigación de impactos ambientales del manejo de sedimentos	102
5.1. Propuestas de acciones para prevenir sedimentos en el alcantarillado	102
5.2. Propuestas de acciones para el manejo de sedimentos	103
Capítulo VI. Conclusiones y recomendaciones	110
Referencias	114
Anexos	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.	Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos	23
Tabla 1.2.	Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos	24
Tabla 1.3.	Límites máximos permisibles para los constituyentes tóxicos en el extracto PECT	25
Tabla 2.1.	Fuentes de los sedimentos del alcantarillado	32
Tabla 2.2.	Contaminantes existentes en sedimentos de alcantarillados combinados	33
Tabla 2.3.	Concentración promedio ponderada (CPP) de metales pesados en muestras de agua de lluvia colectada en Ciudad Universitaria durante 2003 - 2004	34
Tabla 2.4.	Contaminantes típicos en aguas residuales de distintos sectores industriales	35
Tabla 2.5.	Caracterización representativa del agua residual municipal para América Latina y el Caribe	36
Tabla 2.6.	Efectos y consecuencias de la deposición de sedimentos de alcantarillado	37
Tabla 2.7.	Características físicas y químicas de los sedimentos de una alcantarilla por tipo	43
Tabla 2.8.	Resumen de los resultados de los análisis químicos de los sedimentos en alcantarillado	44
Tabla 2.9.	Características químicas de los sedimentos de un interceptor en verano e invierno	45
Tabla 2.10.	Porcentaje de carga de contaminación total asociada con diferentes fracciones de tamaño de partícula	47
Tabla 3.1.	Valores de los atributos de los impactos	55
Tabla 3.2.	Coordenadas geográficas de los sitios de muestreo de sedimentos en la CDMX	58
Tabla 3.3.	Preservación de muestras según Normas Mexicanas	63
Tabla 3.4.	Pruebas de laboratorio y métodos aplicados	64
Tabla 4.1.	Acciones del manejo de los sedimentos extraídos del alcantarillado de la CDMX	76
Tabla 4.2.	Árbol de factores del sistema ambiental susceptibles de ser afectados	77
Tabla 4.3.	Matriz de identificación de impactos ambientales	78
Tabla 4.4.	Matriz de caracterización de impactos ambientales	78
Tabla 4.5.	Características químicas de los sedimentos de una alcantarilla	83
Tabla 4.6.	Concentraciones de metales pesados en sedimentos	84
Tabla 4.7.	Concentraciones de coliformes fecales totales en sedimentos	85
Tabla 4.8.	Resultados de toxicidad	85

Tabla 4.9.	Escala de la clasificación de toxicidad con equipo Microtox y valores de UT	85
Tabla 4.10.	Características físicas de los sedimentos de una alcantarilla	86
Tabla 4.11.	Resultados del análisis granulométrico	88
Tabla 4.12.	Ponderación de factores ambientales	89
Tabla 4.13.	Concentraciones de referencia totales (CRt) por tipo de uso de suelo	92
Tabla 4.14.	Límites máximos permisibles de contaminantes	94
Tabla 4.15.	Valoración cuantitativa del impacto ambiental del manejo de sedimentos extraídos de la red de alcantarillado de la CDMX	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.	Sistema de alcantarillado de la Ciudad de México	18
Figura 1.2.	Zonas en las que se divide la Ciudad de México para el mantenimiento de la red de alcantarillado	19
Figura 1.3.	Extracción de sedimentos: a) Técnica de malacates, b) Camión hidroneumático	19
Figura 1.4.	Camiones hidroneumáticos: a) Vasu-K, b) Vactor, c) Vac-Con	20
Figura 1.5.	Partes principales del equipo hidroneumático	21
Figura 1.6.	Equipo de malacate	22
Figura 2.1.	Entrada de sólidos a atarjeas	28
Figura 2.2.	Principales entradas y salidas de los sedimentos en los sistemas de alcantarillado urbano	30
Figura 2.3.	Video inspección en atarjeas	31
Figura 2.4.	Efecto del lecho de sedimentos en la capacidad de flujo de las alcantarillas	39
Figura 2.5.	Fuerzas hidrodinámicas que se ejercen sobre las partículas	40
Figura 2.6.	Sedimentos típicos en una alcantarilla	42
Figura 2.7.	Granulometría de los sedimentos de atarjeas, colectores e interceptores	44
Figura 2.8.	Velocidades y distribución de sedimentos suspendidos en tiempo seco	46
Figura 3.1.	Metodología para la evaluación del impacto ambiental	49
Figura 3.2.	Sitios de muestreo de sedimentos en la CDMX	58
Figura 3.3.	Equipo de malacates en la ciudad de Acapulco	60
Figura 3.4.	Localización del sitio de muestreo de la ciudad de Acapulco	61
Figura 3.5.	Estratos muestreados en las ciudades de México y Acapulco	61
Figura 3.6.	Función de transformación creciente, formada con dos parábolas, que crece rápidamente para valores del indicador pequeños y grandes, y lentamente para valores intermedios	66
Figura 4.1.	Diagrama de las actividades durante el manejo sedimentos en la Ciudad de México	69
Figura 4.2.	Extracción de sedimentos mediante camiones hidroneumáticos	70
Figura 4.3.	Desazolve con equipos de malacates	71
Figura 4.4.	Equipo de recolección de sedimentos	73
Figura 4.5.	Ubicación de la zona de transferencia de sedimentos	74
Figura 4.6.	Distribución de secciones en la zona de transferencia	74
Figura 4.7.	Secciones de la zona de transferencia	75
Figura 4.8.	Curvas granulometría de los sedimentos	87
Figura 4.9.	Función de transformación del factor: contaminación del suelo	90
Figura 4.10.	Función de transformación del factor: Calidad de aguas residuales	93

Figura 4.11.	Función de transformación del factor: Calidad del aire	96
Figura 4.12.	Función de transformación del factor: Calidad del paisaje	97
Figura 4.13.	Función de transformación del factor: seguridad y salud	98
Figura 4.14.	Función de transformación del factor: Inundaciones	99
Figura A.1.	Uso de suelo de la zona de transferencia	118
Figura A.2.	Afectación a la calidad del paisaje	120
Figura A.3.	Afectación a las vialidades	122

Abreviaturas y acrónimos

Ag	Plata
Al	Aluminio
APHA	American Public Health Association
As	Arsénico
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
Ba	Bario
C.C.	Coefficiente de curvatura
C.U.	Coefficiente de uniformidad
CaCO₃	Carbonato de calcio
Cd	Cadmio
CDMX	Ciudad de México
CE₅₀	Concentración efectiva media
Co	Cobalto
CO₂	Dióxido de carbono
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
COT	Carbón Orgánico Total
Cr	Cromo
CRETIB	Corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad y biológico infecciosas
Cu	Cobre
CV	Coefficiente de variación
D₁₀	Diámetro del 10 por ciento de partículas
D₃₀	Diámetro del 30 por ciento de partículas
D₆₀	Diámetro del 60 por ciento de partículas
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DEHP	Di(2-etilhexil) ftalato
DGCOH	Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EPA	Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental)
F	Flúor
Fe	Fierro
H₂S	Sulfuro de hidrogeno
Hg	Mercurio
km	Kilómetros
l	Litros
LAS	Sulfonatos de alquilbenceno lineales
m	Metros
Máx	Máximo

Mín	Mínimo
Mn	Manganeso
Mo	Molibdeno
NH₃	Amoníaco
NH₄ -N	Nitrógeno amoniacal
Ni	Níquel
NMX	Norma Mexicana
NOM	Norma Oficial Mexicana
NPE	Etoxilatos de nonilfenol
P	Fósforo
PAH	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos
Pb	Plomo
pH	Potencial de Hidrógeno
PTAR's	Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales
SACMEX	Sistema de Aguas de la Ciudad de México
s	Segundos
Se	Selenio
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Sn	Estaño
SST	Sólidos suspendidos totales
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
Ti	Titanio
UI	Unidades de Importancia
V	Vanadio
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México
Zn	Cinc

Resumen

El agua residual contiene sólidos disueltos y en suspensión tanto de naturaleza orgánica como inorgánica; una vez en el alcantarillado, una fracción de estos sólidos se precipita formando sedimentos. Los sedimentos en sistemas de alcantarillado pueden dar lugar a importantes problemas ambientales, sociales e hidráulicos, como inundaciones y consecuentemente pérdidas de vidas humanas y económicas. La remoción de estos sedimentos es una solución a dichos problemas. Una vez que los sedimentos son extraídos del alcantarillado, se realiza una serie de actividades para su disposición que, en ciertas condiciones, son generadoras de impactos ambientales en el suelo, en la salud de los trabajadores y en la calidad del agua.

El objetivo de este trabajo fue determinar el impacto ambiental causado por el manejo de los sedimentos extraídos de la red de alcantarillado de la Ciudad de México durante las actividades de mantenimiento para, posteriormente, proponer medidas de prevención y mitigación.

La metodología utilizada para la evaluación de impactos ambientales fue la propuesta por Rau en 1980, la cual en términos generales se constituye por las etapas de identificación de impactos, valoración de impactos y prevención de impactos. En la etapa de identificación de impactos se realizó un muestreo de sedimentos del sistema de colectores en 9 sitios de la Ciudad de México; posteriormente, los sedimentos fueron caracterizados a través de ensayos en el laboratorio, dando como resultado que se clasifican en arenas mal graduadas con grava y pocos finos (SP) según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), y sus densidades se encuentran en el ámbito de 2246 a 2628 kg/m³. Se determinó que los sólidos totales son proporcionales al contenido orgánico; este último con valores máximos del 29%. Las concentraciones de DQO y DBO se encuentran en un ámbito de 1920 a 7404 mg/kg y de 100 a 1280 mg/kg en base húmeda, respectivamente. Por otra parte, las concentraciones de plomo en los sedimentos varían de 43 a 125 mg/kg en base seca y superan lo establecido por Nriagu (1978) para suelos no contaminados. Además, las concentraciones de cadmio en sedimentos sobrepasan los niveles considerados como tóxicos para algunas especies vegetales (Aller y Deban, 1989). Por lo tanto, a partir de la caracterización, se concluyó que el impacto ambiental más significativo se produce en el suelo durante el almacenamiento de sedimentos en la Zona de Transferencia.

Finalmente, con base en los resultados de la evaluación de impactos, se proponen acciones tanto preventivas como correctivas para tomarse en cuenta en el manejo de sedimentos con el propósito de mitigar los impactos ambientales producidos. Cabe mencionar que, mayores esfuerzos son aún necesarios para diseñar a detalle las medidas de mitigación. Sin embargo, esta investigación cuenta con los precedentes suficientes para el desarrollo de las mismas.

Palabras clave: impacto ambiental, sedimentos del alcantarillado, caracterización.

Abstract

Wastewater contains dissolved and suspended solids, both organic and inorganic, and once it reaches the drainage system, a fraction of these solids precipitates forming sediments. The sediments in drainage systems might lead to crucial environmental, social and hydraulic issues, such as floods and, consequently, human and economic loss. The removal of these sediments is a solution to such problems. Once they are extracted from the drainage system, they are to be disposed of through a series of actions, which, under certain conditions, create environmental impacts on the soil, on workers' health, and on water quality.

The aim of this investigation was to determine the environmental impact caused by the handling of sediments extracted from Mexico City's drainage network during maintenance tasks, as well as to propose prevention and mitigation measures.

The methodology applied to assess the environmental impacts was the one proposed by Rau in 1980. In general terms, it consists of the following stages: impact identification, assessment and prevention. In the first stage, there was a sampling of sediments in the collectors system from 9 spots of Mexico City. Then, the sediments were characterized through laboratory tests, with the following results: the sediments are classified in poorly graded sands with gravel (SP) according to the Unified Soil Classification System (USCS), and their densities range between 2246 and 2628 kg/m³. It was determined that all these solids are proportional to the organic content, whose peak values amount to 29%. DQO and DBO concentrations range between 1920 and 7404 mg/kg, and between 100 and 1280 mg/kg on a humid basis, respectively. On the other hand, lead concentrations in sediments range between 43 and 125 mg/kg on a dry basis exceeding what was established by Nriagu (1978) for non-polluted soils. Furthermore, cadmium concentrations in sediments surpass the levels considered as toxic for some plant species (Aller & Deban, 1989). Hence, the characterization allowed us to conclude that the most significant environmental impact is produced in the soil during the storage of sediments in the Transfer Zone.

Finally, based upon the results of the assessment of impacts, It was proposed a series of actions, both preventive and corrective, to be taken into account when handling sediments in order to mitigate environmental impacts. It is worth mentioning that despite the fact that designing detailed mitigation measures would imply further efforts, this investigation has the sufficient precedents to develop them.

Keywords: environmental impact, drainage system sediments, characterization.

Introducción

En las delegaciones centrales de la Ciudad de México (CDMX), el alcantarillado sanitario data del año 1925 cuando se concluyeron las obras del sistema de drenaje y saneamiento por lo que en buena parte ha superado su vida útil (Martínez, 1967).

En la medida en que envejecen los sistemas de alcantarillado, se presentan con mayor frecuencia obstrucciones, derrumbes y tramos en contrapendiente. Por esta razón, las municipalidades en todo el mundo están haciendo esfuerzos para mejorar el nivel de desempeño de sus sistemas de alcantarillado (EPA., 1999).

La inspección y la limpieza de atarjeas y colectores de aguas residuales y pluviales son actividades propias del mantenimiento e indispensable para el buen funcionamiento del sistema de alcantarillado. Existen varias técnicas empleadas para eliminar obstrucciones y que constituyen acciones de mantenimiento preventivo (EPA., 1999).

La CDMX cuenta con un programa de desazolve del sistema de alcantarillado, se estima que diariamente se extraen 140 m³ de sedimentos los cuales son transportados a un sitio de tiro denominado Zona de Transferencia, localizado en la Delegación Iztapalapa, donde se apilan temporalmente sin tratamiento y sin medidas de protección ambiental en el sitio.

En la actualidad en México se cuenta con poca información de las características de los sedimentos y de las consecuencias de su manejo cuando son extraídos, transportados y dispuestos temporalmente en el sitio de transferencia.

Por lo que en el presente trabajo se describe el manejo que los organismos operadores de los sistemas de alcantarillado dan a los sedimentos extraídos de las redes y con base en el muestreo y los análisis de laboratorio de sus características, se determinaron los impactos que se producen en el ambiente.

Objetivo general

Determinar el impacto ambiental del manejo de los sedimentos extraídos de una red de alcantarillado urbano por actividades de mantenimiento.

Objetivos específicos

- Identificar y describir los impactos ambientales en las diferentes etapas del manejo de sedimentos.
- Proponer medidas de prevención y mitigación de impactos ambientales.

Alcances

- Se propuso una técnica de muestreo de sedimentos para alcantarillados urbanos.
- Se tomaron 13 muestras en zonas con diferente uso de suelo de la CDMX y una en la ciudad de Acapulco, Guerrero como testigo.
- Se realizó un muestreo determinístico.
- Los parámetros analizados fueron: DQO, DBO, fósforo reactivo, pH, grasas y aceites, sólidos totales, contenido orgánico, densidad, granulometría, coliformes fecales, toxicidad aguda y con respecto a metales pesados: plomo, cromo y cadmio.

Capítulo I. Antecedentes

Un sistema de alcantarillado consiste en un conjunto de conductos subterráneos llamados alcantarillas y obras complementarias, cuya función es recibir, conducir, ventilar y evacuar las aguas residuales de la población. De no existir estas redes de recolección de agua, se pondría en grave peligro la salud de las personas debido al riesgo de enfermedades epidemiológicas y, además, se causarían importantes pérdidas materiales (CONAGUA, 2009).

En el presente capítulo se presentan los aspectos operativos del sistema de evacuación de agua residual y pluvial de la Ciudad de México que tienen influencia en el análisis de impacto ambiental de los sedimentos que, como parte del mantenimiento, se extraen de manera programada de las alcantarillas de la red.

1.1. El sistema de alcantarillado de la Ciudad de México

Los sistemas de alcantarillado sanitario han sido ampliamente utilizados, estudiados y estandarizados. Se construyen con tuberías a partir de 20 cm de diámetro que permiten operar el sistema, no obstante la incertidumbre en los parámetros que definen el gasto de diseño, como son la densidad poblacional y su estimación futura, mantenimiento inadecuado o nulo, representan un problema.

En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) el sistema de alcantarillado es complejo, ya que drena la cuenca hidrológica endorreica del Valle de México, conformada por las 16 delegaciones de la Ciudad de México y 60 municipios pertenecientes a los estados de Hidalgo y de México. El sistema está integrado por los siguientes elementos: atarjeas, colectores, interceptores, emisores, plantas de tratamiento de aguas residuales, estaciones de bombeo, presas, cauces a cielo abierto, obras accesorias y descargas finales.

Una buena parte del alcantarillado de la ZMVM está conformado por el alcantarillado sanitario de la Ciudad de México, que actualmente es administrado por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX).

El sistema es combinado, su estructura comienza en las redes de atarjeas que, a su vez, desaguan en los colectores, siguiendo hacia el Sistema General del Desagüe y el Drenaje Profundo.

Las redes de atarjeas recolectan las aguas residuales y pluviales provenientes de las descargas domiciliarias y de las coladeras pluviales existentes en las calles. Estas alcantarillas son de 0.2 a 0.4 m de diámetro y vierten en la red de colectores, para su posterior desalojo; la longitud de la red de atarjeas de la Ciudad de México es mayor a 10237 km.

La red de colectores se compone de alcantarillas de 0.4 m a 4.0 m de diámetro, tiene 2038 km de longitud y en su desarrollo cuenta con 86 plantas de bombeo y 91 pasos a desnivel (DGCOH, 2003).

El Sistema General del Desagüe está formado por lagos, lagunas y presas de regulación (Figura 1.1), con capacidad de 11 millones de metros cúbicos, canales a cielo abierto con longitud total de 123.8 km, que incluyen al Gran Canal del Desagüe y al Canal de Chalco, los ríos San Javier, de los Remedios, Tlalnepantla y Canal Nacional, así como los ríos entubados de San Buenaventura, Churubusco, La Piedad y Consulado; con longitud conjunta de 47.2 km (DGCOH, 2003).

La infraestructura del Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México abarca trece interceptores, además del Emisor Central y el Canal Nacional - Canal Chalco. Actualmente se encuentra en construcción el Túnel Emisor Oriente y está previsto construir el Emisor Poniente 2, Túnel Chimalhuacán-Río de Los Remedios, Túnel Chimalhuacán II y Semiprofundo Canal General (SACMEX, 2012).

Toda el agua recolectada por algún tipo de infraestructura del sistema de alcantarillado en la Ciudad de México, ya sea residual o pluvial es evacuada por alguna de las cuatro salidas artificiales que se han construido a lo largo de su historia:

1. Tajo de Nochistongo
2. Primer Túnel de Tequisquiac
3. Segundo Túnel de Tequisquiac
4. Emisor Central

El Emisor Central y el Tajo de Nochistongo vierten las aguas residuales en el río El Salto a través de un portal de salida, estas aguas residuales se conducen hasta la presa Requena o al canal El Salto-Tlamaco y posteriormente al río Tula, que a su vez, descarga en la presa Endhó para satisfacer las demandas de riego agrícola de la zona.

Por otra parte, el primero y segundo Túnel de Tequisquiac vierten en el río Salado, el cual desemboca en el río Tula varios kilómetros aguas abajo de la presa Endhó.

El camión hidroneumático se emplea para desazolver las redes de atarjeas, mientras que los equipos de malacates se emplean para desazolver las redes de colectores. Existe un programa de desazolve que da prioridad a las alcantarillas que presentan contrapendiente y que son importantes para el transporte de las aguas residuales. En algunos casos, el desazolve se realiza como respuesta a emergencias, por ejemplo, inundaciones o brotes de agua residual en coladeras pluviales y pozos de visita.

1.3.1. Desazolve mediante camiones hidroneumáticos

El SACMEX dispone de camiones hidroneumáticos de tres marcas (Figura 1.4): Vasu-K, Vactor y Vac-Con.

El primero de la lista es fabricado y comercializado en México y los dos últimos son importados de Estados Unidos de América.



Figura 1.4. Camiones hidroneumáticos: a) Vasu-K, b) Vactor, c) Vac-Con

El funcionamiento de las tres marcas de los camiones hidroneumáticos es similar, la diferencia entre ellas es solamente el arreglo de las partes del equipo en el chasis del camión (Figura 1.5), que son las siguientes:

- Tanque de residuos (1)
- Turbina de succión (2)
- Tanques de agua (3)
- Bomba de agua (4)
- Pluma de succión (5)
- Carrete de manguera articulado (6)
- Caja de controles (7)



Figura 1.5. Partes principales del equipo hidroneumático

Las partes del equipo que suelen averiarse con más frecuencia son: turbina de succión, sensores y controles de la pluma. La turbina de succión se quema debido a que los sensores y los controles no se accionan a tiempo. Para prevenir este problema, dichas partes reciben mantenimiento cada 6 meses.

Con diámetro de 0.3 m, la pluma de succión en conjunto con la turbina de succión aspiran sedimentos con distinto porcentaje de sólidos totales, no obstante, la pluma se obstruye con rocas y basura de gran tamaño; para destaparla, se usa la manguera de presión. Este fenómeno ocurre recurrentemente cuando la alcantarilla se encuentra obstruida en su totalidad.

El chofer y un ayudante integran la tripulación de cada camión hidroneumático. Ambas personas conocen el funcionamiento del camión y la operación de los controles de turbinas y bombas. Se tienen 3 jornadas de trabajo: 7:00 a 15:00, 15:00 a 22:00 y 22:00 a 7:00 horas.

1.3.2. Desazolve mediante equipos de malacates

El Sistema de Aguas de la Ciudad de México dispone de 9 brigadas asignadas al desazolve de colectores, distribuidas en las 6 zonas operativas mostradas en la Figura 1.2. Cada brigada está integrada por 7 personas: un sobrestante, un encargado y 5

operadores. Cada brigada cuenta con un campamento provisional con baño, varios equipos de malacates de reserva, un equipo mecánico para cargar los sedimentos al camión de volteo y una caseta de vigilancia, ésta última es utilizada por los operadores como comedor y vestidor.

El equipo de protección del personal de operación es el siguiente: guantes de carnaza, chalecos reflejantes, pantalones de trabajo, botas con casquillo, sombrero o gorra y protector de oídos, además, el área de trabajo está resguardada por conos de delimitación.

Los equipos de malacates cuentan con motor a diésel, chasis bastidor de acero de estructura reforzada, montado sobre dos neumáticos y un eje, carrete de cable de acero de 1/2" con una longitud de 150 m y carrete de preparación de cable de acero de 1/4" con longitud de 150 m, transmisión y polea superior de acero, embrague de agujas con cople de seguridad y soporte de ajuste rápido, caja porta herramientas, tolvas de protección y dragas de distintos diámetros (Figura 1.6).



Figura 1.6. Equipo de malacate

En algunas ocasiones, los operadores de los equipos de malacates destapan coladeras de banqueta usando un tirabuzón, esta actividad es fundamental para el funcionamiento adecuado de la red de alcantarillado pues, de no realizarse, el agua pluvial no se dirigiría al alcantarillado, ocasionando inundaciones. Cuando los operadores destapan las coladeras pluviales únicamente extraen sedimentos gruesos y basura, residuos no considerados en los alcances de esta tesis.

1.4. Normatividad mexicana aplicable al manejo de los sedimentos del alcantarillado sanitario

En este subcapítulo se resumen los aspectos normativos que pueden considerarse para el manejo ambientalmente adecuado de los sedimentos extraídos en el desazolve de alcantarillas.

1.4.1. NOM-004-SEMARNAT-2002

La NOM-004-SEMARNAT-2002 establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger al medio ambiente y la salud humana.

La norma define a los sólidos, a los biosólidos y a los lixiviados de la siguiente forma

- a) Lodos: son los sólidos con un contenido variable de humedad, provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que no han sido sometidos a procesos de estabilización.
- b) Biosólidos: son los lodos que han sido sometidos a procesos de estabilización y que por su contenido de materia orgánica, nutrientes y características adquiridas después de su estabilización, puedan ser susceptibles de aprovechamiento
- c) Lixiviado: es el líquido proveniente de los lodos y biosólidos, el cual se forma por reacción o percolación y que contiene contaminantes disueltos o en suspensión.

Cabe mencionar que el término *lixiviado* será usado en los siguientes capítulos de la tesis.

Los límites máximos permisibles de metales pesados establecidos en esta norma se mencionan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos

Contaminante (determinados en forma total)	Excelentes mg/kg en base seca	Buenos mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1 200	3 000
Cobre	1 500	4 300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2 800	7 500

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2002

Los límites máximos permisibles de patógenos y parásitos en los lodos y biosólidos se establecen en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
		Coliformes fecales NMP/g en base seca	<i>Salmonella spp.</i> NMP/g en base seca
A	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 1(a)
B	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

(a) Huevos de helmintos viables

NMP número más probable

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2002

De la Tabla 1.2, los biosólidos de clase A se pueden aprovechar en usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación, los biosólidos de clase B son aprovechables en usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación y por último, los de clase C se pueden aprovechar en usos forestales, mejoramiento de suelos y usos agrícolas

Los biosólidos que cumplan con lo establecido en esta norma pueden ser manejados como residuos no peligrosos.

1.4.2. NOM-052-SEMARNAT-2005

La NOM-052-SEMARNAT-2005 establece que para que un residuo se considere peligroso debe de cumplir con alguna de las siguientes características: corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico ambiental, inflamable, biológico-infeccioso

Esta norma menciona en su apartado 6.3.1 que los lodos y biosólidos están regulados por la NOM-004-SEMARNAT-2002, sin embargo, debido a la poca información que se tiene de los sedimentos del alcantarillado, es importante considerar la posibilidad de que tengan alguna de las características antes mencionadas, por lo que en la Tabla 1.3 se enlistan algunos constituyentes tóxicos ambientales de la norma.

Tabla 1.3. Límites máximos permisibles para los constituyentes tóxicos en el extracto PECT

No. CAS ¹	Contaminante	Límite Máximo Permisible (mg/L)
Constituyentes inorgánicos (metales)		
7440-38-2	Arsénico	5
7440-39-3	Bario	100
7440-43-9	Cadmio	1
7440-47-3	Cromo	5
7439-97-6	Mercurio	0.2
7440-22-4	Plata	5
7439-92-1	Plomo	5
7782-49-2	Selenio	1
Constituyentes orgánicos semivolátiles		
93-72-1	Acido 2,4,5-Triclorofenoxipropiónico	1
72-20-8	Endrin	0.02
76-44-8	Heptacloro (y su Epóxido)	0.008
67-72-1	Hexacloroetano	3
58-89-9	Lindano	0.4
74-43-5	Metoxicloro	10
98-95-3	Nitrobenceno	2
87-86-5	Pentaclorofenol	100
8001-35-2	Toxafeno	0.5
Constituyentes orgánicos volátiles		
71-43-2	Benceno	0.5
108-90-7	Clorobenceno	100
87-68-3	Hexaclorobutadieno	0.5
78-93-3	Metil etil cetona	200
110-86-1	Piridina	5
127-18-4	Tetracloroetileno	0.7
56-23-5	Tetracloruro de Carbono	0.5
79-01-6	Tricloroetileno	0.5

¹ No. CAS: Número del Chemical Abstracts Service (Servicio de Resúmenes Químicos)

Fuente: NOM-052-SEMARNAT-2005

1.4.3. NOM-161-SEMARNAT-2011

En la Norma oficial mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011 se establecen los criterios para clasificar a los residuos de manejo especial y determinar cuáles están sujetos a plan de manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo.

Uno de los criterios para clasificar a los residuos de manejo especial es que no reúnan características domiciliarias o no posean alguna de las características de peligrosidad en los términos de la NOM-052-SEMARNAT-2005.

Para que los lodos y biosólidos sean considerados de manejo especial, el generador tiene que superar la cantidad de 100 toneladas anuales.

1.4.4. NMX-AA-112-1994-SCFI

En la norma se establece el método de prueba para evaluar la toxicidad aguda con photobacterium phosphoreum en sedimentos.

Este método se basa en la medición de la toxicidad aguda mediante la definición de la concentración efectiva media (CE_{50}) observando la evolución del efecto que sustancias puras, combinadas, cuerpos receptores, efluentes, lixiviados y sedimentos pueden tener sobre la intensidad de la luz emitida por la bacteria Photobacterium phosphoreum en condiciones controladas de exposición. La concentración efectiva media (CE_{50}) de sedimentos es la que reduce la intensidad de luz emitida por la bacteria photobacterium phosphoreum a un 50% después de ser expuesta una sola vez durante un período corto no mayor a 30 min.

Ante la presencia de sustancias tóxicas, la luminiscencia disminuye de forma proporcional a la carga tóxica en la muestra problema. Este decaimiento se produce como resultado del daño ocasionado a los procesos metabólicos asociados con la respiración bacteriana.

Interpretación de la normativa

La normativa es específica, los sedimentos extraídos de las alcantarillas que cumplan con los límites máximos permisibles de contaminantes que establece la NOM-004-SEMARNAT-2002 podrán ser manejados de dos maneras:

- 1.- Si superan las 100 toneladas anuales se manejarán como residuos de manejo especial.
- 2.- Si el primer caso no se cumple podrán ser manejados como residuos no peligrosos.

En caso de no cumplir con los límites de la NOM-004-SEMARNAT-2002 se consideran residuos peligrosos, para dejar de serlo, éstos deben cumplir con los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en la NOM-052-SEMARNAT-2005.

En la actualidad, los sedimentos extraídos de las alcantarillas no son estabilizados y se consideran como residuos no peligrosos. Éstos son dispuestos en sitios como rellenos sanitarios o tiraderos, sin considerar el impacto ambiental generado y las afectaciones a la salud humana.

Capítulo II. Marco teórico

El agua residual contiene sólidos disueltos y en suspensión tanto de naturaleza orgánica como inorgánica, una vez en el alcantarillado, una fracción de estos sólidos se precipita formando sedimentos. El material orgánico tiende a adherirse a los sedimentos inorgánicos, de mayor densidad, por tanto son depositados con ellos.

Los sedimentos forman una superficie rugosa que propicia una mayor adhesión de la materia orgánica y otros contaminantes, por lo que el espesor de la capa de sedimentos tiende a incrementarse.

Entre los efectos de los sedimentos está la contribución a la contaminación ambiental ya que, durante el mantenimiento de la red de alcantarillado se extraen y, sin ser tratados, son dispuestos en sitios sin protección ambiental. En el caso de presentarse el lavado natural por lluvias, los sedimentos pueden llegar a las plantas de tratamiento de aguas residuales afectando su operación, o a cuerpos de agua naturales. Otro efecto es la pérdida de capacidad hidráulica de los conductos, que a su vez puede provocar que las calles se inunden en época de lluvias.

Se han reconocido desde hace tiempo los problemas que pueden causar los sedimentos y por ello se han propuesto obras para reducir la entrada de partículas de gran tamaño y elevada densidad al sistema de alcantarillado, como lo son las trampas de arenas en coladeras de baqueta y bocas de tormenta. No obstante, los sólidos sedimentables logran entrar al sistema de alcantarillado urbano causando problemas ambientales e hidráulicos, con efectos económicos y sociales.

2.1. Sedimentos

La formación de sedimentos en el alcantarillado es un proceso complejo de varias etapas. Los sólidos depositados en las calles pueden ser: a) removidos en parte por el servicio de limpia de la ciudad, b) re-suspendidos a la atmósfera por el viento, o c) lavados por el escurrimiento hacia la cuneta e ingresan a coladeras pluviales de banqueta que, a su vez, vierten en las redes de atarjeas (Butler y Davies, 2011). Un porcentaje de los sólidos es retenido en el desarenador de la coladera de banqueta por sedimentación y el restante es transferido a la alcantarilla receptora (Figura 2.1).

Otra fuente importante que contribuye con sólidos al sistema de alcantarillado, son las 24 áreas naturales protegidas de la Ciudad de México, ya que al ser una cuenca endorreica, el flujo de las precipitaciones es entubado y desalojado mediante el sistema de alcantarillado. Las precipitaciones arrastran sólidos, una parte se deposita en las presas de regulación y otra logra entrar al sistema de alcantarillado.

A lo anterior se suman los sólidos descargados por las 32 plantas de tratamiento de aguas residuales que operan en la Ciudad de México. Aunado a lo anterior, en algunas partes de la CDMX (Zonas de los ex-lagos de Xochimilco y Texcoco) el nivel de aguas freáticas se encuentra por arriba del sistema de alcantarillado, por lo que existe infiltración del acuífero a las alcantarillas en los sitios que presentan derrumbes y juntas desplazadas, contribuyendo al ingreso de sólidos.

Una vez que los sólidos entran al alcantarillado, el material se deposita o es transportado bajo condiciones de canal abierto, como carga de lecho o suspendido. Los sólidos suspendidos se transportan en el cuerpo principal del flujo, mientras que la carga de lecho viaja más lentamente en contacto con la tubería. Parte del material puede depositarse formando sedimentos y/o re-suspenderse a medida que avanza corriente abajo (Ackers *et al.*, 1996).

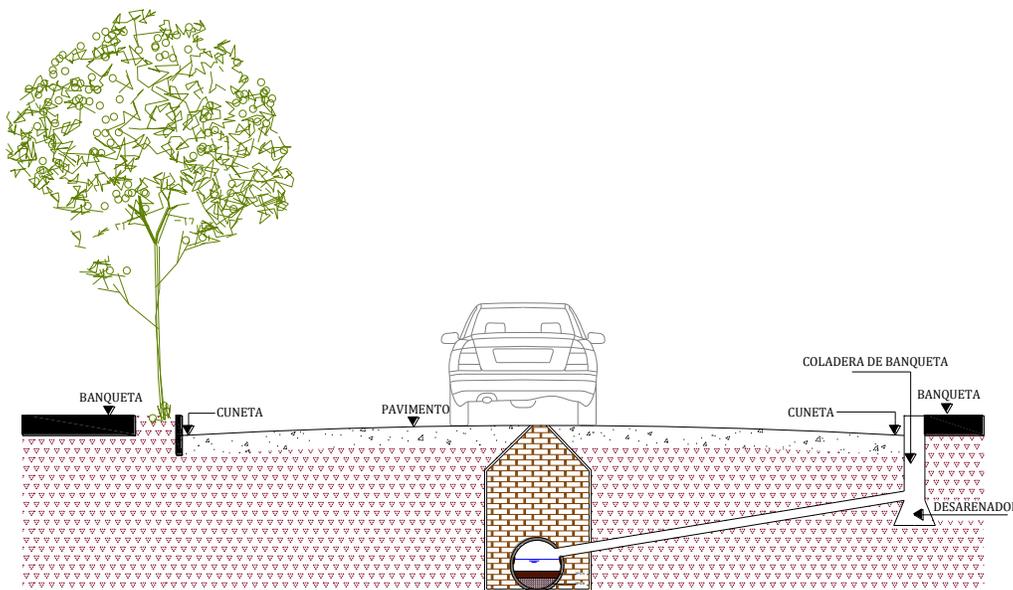


Figura 2.1. Entrada de sólidos a atarjeas

El comportamiento de los sólidos dentro del sistema depende de factores tales como:

- Características físico-químicas del sólido
- Características del flujo (velocidad, tipo de flujo -uniforme, estable o inestable-)
- Características de la red de alcantarillado (diseño, geometría, material)

El tipo de partículas determina su movimiento a través del sistema, las partículas de tamaño muy pequeño o de baja densidad pueden permanecer en suspensión en todas las condiciones de flujo y se transportan a través del sistema sin depositarse. Las partículas con baja velocidad de sedimentación pueden formar sedimentos en los períodos de flujo bajo, y ser arrastradas fácilmente cuando se producen velocidades más altas en las alcantarillas como resultado de tormentas o variaciones diurnas en el flujo. En cambio, las partículas más grandes y más densas sólo podrán ser transportadas por caudales máximos, estas partículas tienden a formar sedimentos.

La deposición ocurre comúnmente: durante los períodos de estiaje, en la noche cuando el flujo es bajo y al disminuir los flujos entre tormentas. Los sedimentos también se forman en las discontinuidades estructurales e hidráulicas tales como pozos de visita, cambios de gradiente hidráulico y estructuras accesorias. Sólo las alcantarillas muy inclinadas son inmunes a la deposición (Butler y Davies, 2011).

Aunado a lo anterior, en la Ciudad de México la sedimentación de partículas ocurre debido al hundimiento regional o diferencial del suelo, que ocasiona cambio en la pendiente de las alcantarillas hasta hacerse nula, o bien la pendiente se invierte. Este fenómeno se ha intensificado por la sobreexplotación de agua subterránea.

Por otra parte, las condiciones actuales de descarga de agua son muy diferentes de las que se tenían cuando se diseñó la red. El diseño de las alcantarillas se hace especificando una velocidad mínima que se debe lograr con un gasto mínimo, sin embargo, los gastos de diseño han cambiado. En el año 1967 la aportación mínima de agua residual per cápita era de 120 l/día, mientras que desde la década de 1990 es de 94 l/día. Si bien, se considera que el gasto mínimo que se presenta en una alcantarilla corresponde a la descarga de un inodoro, éste ha cambiado con los diseños modernos, en 1967 el gasto mínimo era de 1.5 l/s para un inodoro con un tanque de almacenamiento de 18 l. En la actualidad, con la implementación de inodoros ecológicos, el gasto mínimo es de 1 l/s para un inodoro con un tanque de almacenamiento de 4 l. Considerando lo anterior, las alcantarillas diseñadas antes del año 1990 son propensas a acumular sedimentos.

Una vez que los sólidos se depositan, forman sedimentos en las alcantarillas y pueden ser: a) arrastrados por flujos máximos hacia las plantas de tratamiento de aguas residuales o a cuerpos de agua receptores; o b) extraídos por actividades de mantenimiento y llevados a rellenos sanitarios o tiraderos (Figura 2.2).

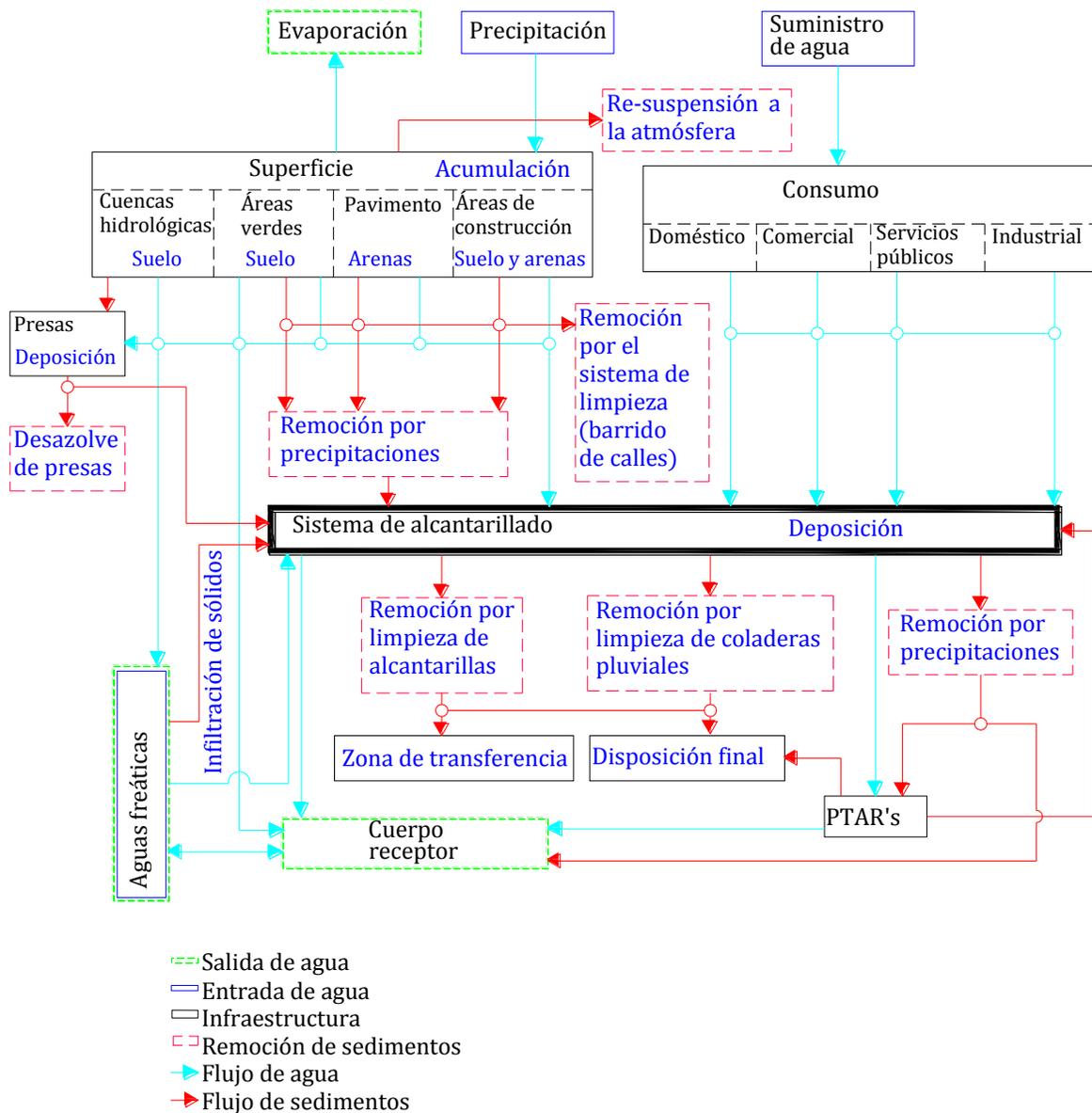


Figura 2.2. Principales entradas y salidas de los sedimentos en los sistemas de alcantarillado urbano

Fuente: Adaptado para la CDMX de Butler y Davies, 2011

En un estudio de campo, realizado en la Colonia Santiago de la Ciudad de Puebla en el año 2013, se encontró que las alcantarillas de diámetros menores a 0.40 m contenían grandes cantidades de sedimentos; el estudio se realizó para diagnosticar el estado de las alcantarillas con el propósito de rehabilitar el sistema de alcantarillado sanitario de la Colonia Santiago, localizada en centro de la Ciudad de Puebla, mediante la técnica de tuberías curadas in situ, este procedimiento requirió conocer las condiciones físicas de las tuberías, para lo cual se utilizó la video inspección.

La actividad consistió en inspeccionar mediante un sistema de video montado sobre un vehículo anfíbio operado a control remoto. Se video grabaron 703.7 m de tuberías de

diámetro menor a 0.40 m y 563.8 m de tuberías de diámetro mayor a 0.70 m; al realizar la video inspección se encontró que las tuberías de diámetro pequeño presentaron gran cantidad de sedimentos a tal grado que no fue posible el paso del robot y se suspendió la inspección de esa tubería.

En la Figura 2.3 se presentan cuatro fotografías en donde se aprecian algunos resultados de la video inspección.



Figura 2.3. Video inspección en atarjeas

En el estudio mencionado se determinó que el 72% de las tuberías de diámetros menores a 0.4 m presentaron problemas de acumulación de sedimentos a partir de 3 m del pozo de visita, en ambos extremos del tramo de alcantarilla (Zárate, 2013).

2.2. Origen de los sedimentos

Los sólidos objeto de esta tesis se definen como cualquier material suspendido y disuelto presente en aguas pluviales o aguas residuales que, bajo condiciones apropiadas son capaces de formar sedimentos en las alcantarillas y estructuras hidráulicas conexas.

Los sólidos se clasifican en:

- Arenas
- Sólidos disueltos y suspendidos
 - Sanitarios
 - De aguas pluviales

Los sólidos disueltos y suspendidos sanitarios se definen como toda la materia orgánica e inorgánica proveniente de las aguas residuales y los sólidos de aguas pluviales se definen como los sólidos presentes en la superficie de la cuenca de la alcantarilla arrastrados por las precipitaciones.

Los sedimentos existentes en las alcantarillas provienen de fuentes muy diversas. De hecho, cualquier actividad o material que genere partículas en el entorno urbano es una fuente de aportación. En general, se pueden establecer cuatro fuentes: agua residual, agua freática, superficie del terreno y obras de ampliación o reparación del alcantarillado (Butler y Davies, 2011). Estas fuentes se definen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Fuentes de los sedimentos del alcantarillado

Origen	Tipo
Agua residual	Materia fecal y orgánica grande con elevada densidad. Partículas fecales finas y otras partículas orgánicas. Basura sanitaria (papeles y material misceláneo vertido al inodoro). Materia vegetal procedente del procesamiento doméstico de alimentos. Materiales procedentes de fuentes industriales y comerciales.
Agua freática	Partículas orgánicas con densidad cercana a la del agua. Partículas inorgánicas con densidad cercana a la del agua.
Superficie de la cuenca	Materia vegetal. Partículas de la erosión del material de techos, calles y áreas verdes. Arenas producidas por la abrasión de superficies de calles o de obras de re-encarpetado. Partículas de los vehículos motorizados (por ejemplo, partículas de los tubos de escape, goma de neumáticos, residuos de vehículos deteriorados, etc.). Material de las obras de construcción (por ejemplo, agregados de construcción, lechadas de cemento, suelos expuestos y otros materiales ilegalmente colocados en las calles, etc.) Basura de las calles y áreas pavimentadas (por ejemplo, papel, plástico, latas, etc.). Limos, arenas y gravas lavadas o arrastradas por el viento de áreas no pavimentadas.
Obras de ampliación y reparación del alcantarillado	Partículas del suelo se infiltran desde el exterior por fugas o fallas de tuberías / pozos / coladeras. Material producido por el deterioro de la infraestructura.

Fuente: Butler y Davies, 2011

2.3. Fuentes de contaminación de sedimentos

Las fuentes de contaminación de los sólidos inertes son numerosas, a continuación se enlistan las principales (Ashley *et al.*, 1999)

1. Atmósfera
2. Superficie de la cuenca
3. Aguas residuales domésticas, comerciales, de servicios públicos e industriales
4. Procesos bioquímicos dentro de la tubería

Algunos contaminantes interactúan con las partículas antes de que entren al alcantarillado y otros interactúan dentro del sistema. Los contaminantes abarcan diversas sustancias, mientras que los sedimentos son partículas que tiene la capacidad de depositarse en el fondo de la alcantarilla. Algunos de los contaminantes existentes en los sedimentos del alcantarillado urbano se enlistan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Contaminantes existentes en sedimentos de alcantarillados combinados

Grupo	Contaminantes o indicadores de contaminación
Sólidos gruesos	Sólidos fecales, desechos sanitarios, etc.
Sólidos suspendidos	SST
Materia orgánica biodegradable	DBO, DQO, COT
Contaminantes tóxicos	Metales pesados (Cu, Zn, Cd, Pb, Ni, Cr, Hg), microcontaminantes orgánicos (plaguicidas, herbicidas, hidrocarburos clorados, hidrocarburos poliaromáticos (PAH), sulfonatos de alquilbenzeno lineales (LAS), etoxilatos de nonilfenol (NPE), di(2-etilhexil) ftalato (DEHP). Otros tipos - amoníaco (NH ₃), ácido sulfhídrico (H ₂ S), hidrocarburos (grasas y aceites)
Nutrientes	Nitrógeno y fósforo
Bacterias y virus	Organismos indicadores: E. Coli, coliformes fecales, estreptococos fecales, entre otros

Fuente: Schlütter, 1999

Contribución de contaminantes por fuentes superficiales

Las fuentes de contaminantes superficiales son las actividades desarrolladas en la superficie de la cuenca, así como la deposición de partículas atmosféricas o la erosión y arrastre de contaminantes transportados por el aire al área de la cuenca.

Las partículas suspendidas en la atmósfera son originadas por actividades naturales o antropogénicas como son: el uso de aerosoles, procesos de combustión, tránsito de autos, incineración de residuos, industrias, erosión de vialidades pavimentadas, etc. (Ashley *et al.*, 1999). Un ejemplo de partículas suspendidas en la atmósfera son los metales pesados; en la Tabla 2.3 se muestran las concentraciones de muestras de precipitación colectadas en la Ciudad de México en el año 2004.

Tabla 2.3. Concentración promedio ponderada (CPP) de metales pesados en muestras de agua de lluvia colectada en Ciudad Universitaria durante 2003 - 2004

Metales	CPP ($\mu\text{g/l}$)
Al	83.94
Cd	0.88
Cr	1.24
Fe	77.34
Mn	14.33
Ni	3.2
Pb	5.41
V	9.3

Fuente: García, 2007

De la Tabla 2.3 se puede observar que las concentraciones de metales pesados en agua de lluvia son muy bajas en comparación a las concentraciones reportadas en los estudios de caracterización de sedimentos. A pesar de lo anterior, el agua de lluvia es una fuente significativa de contaminantes.

Otras posibles fuentes de contaminación de sedimentos son el excremento de animales, la disposición de residuos sólidos en avenidas, derrames de aceite de automóviles y descomposición de la vegetación dentro de la cuenca.

Un estudio realizado en la ciudad de Karlsruhe, Alemania, (Xanthopoulos y Augustin, 1992) mostró que el 90% de los sedimentos se originaban de fuentes como techos, estacionamientos, carreteras y pavimentos. La mayoría de los sedimentos encontrados en las avenidas tuvieron un tamaño de partícula entre 50 – 80 μm . En estas partículas se encontraron metales pesados, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) y aceites minerales, con un grado de concentración correspondiente a la densidad de tráfico vehicular.

Contribución de contaminantes por aguas residuales

En algunos casos, los sólidos depositados en la superficie son arrastrados por lluvias y logran entrar al alcantarillado. Los sólidos del alcantarillado se transportan junto a los contaminantes que contiene el agua residual.

En la Ciudad de México la aportación de agua residual al alcantarillado puede ser de cuatro tipos: doméstica, comercial, industrial y de servicios públicos. Las aguas residuales industriales pueden contener distintos tipos de contaminantes y dependen del giro de la industria, en la Tabla 2.4 se enlistan los contaminantes típicos de distintos sectores industriales.

Tabla 2.4. Contaminantes típicos en aguas residuales de distintos sectores industriales

Sector industrial	Sustancias contaminantes principales
Construcción	Sólidos en suspensión, metales, pH.
Minería	Sólidos en suspensión, metales pesados, materia orgánica, pH, cianuros.
Energía	Calor, hidrocarburos y productos químicos.
Textil y piel	Cromo, taninos, tensoactivos, sulfuros, colorantes, grasas, disolventes orgánicos, ácidos acético y fórmico, sólidos en suspensión.
Alimentaria	Nitratos, fosfatos, grasas, metales pesados.
Automotriz	Aceites lubricantes, pinturas y aguas residuales.
Siderurgia	Cascarillas, aceites, metales disueltos, emulsiones, sosas y ácidos.
Química inorgánica	Hg, P, fluoruros, cianuros, amoníaco, nitritos, ácido sulfhídrico, F, Mn, Mo, Pb, Ag, Se, Zn, etc. y los compuestos de todos ellos.
Química orgánica	Organohalogenados, organosilícicos, compuestos cancerígenos y otros que afectan al balance de oxígeno.
Fertilizantes	Nitratos y fosfatos.
Papel	Sólidos en suspensión y otros que afectan al balance de oxígeno.
Plaguicidas	Organohalogenados, organofosforados, compuestos cancerígenos, biocidas, etc.
Fibras químicas	Aceites minerales y otros que afectan al balance de oxígeno, pinturas, barnices y tintas, compuestos organoestánicos, compuestos de Zn, Cr, Se, Mo, Ti, Sn, Ba, Co, etc.

Fuente: Barba, 2002

Las aguas residuales de tipo doméstico, comercial y de servicios públicos provienen de áreas habitacionales (incluyen residuos de cocina, baño, lavado de ropa y drenaje de pisos), áreas comerciales y áreas de servicios públicos incluidas las instituciones gubernamentales. Estos tipos de aguas residuales normalmente contienen los mismos contaminantes pero con diferentes concentraciones. En la Tabla 2.5 se listan los contaminantes típicos presentes en las aguas residuales en América Latina y el Caribe de acuerdo con un estudio realizado entre los años 2010 y 2011.

Tabla 2.5. Caracterización representativa del agua residual municipal para América Latina y el Caribe

Parámetros	Media(mg/l)	σ^*
pH (Adimensional)	7.5	0.6
Alcalinidad como CaCO ₃	345	23.1
DBO	240	17.5
DQO	520	39.2
SST	220	24.8
SSV	165	11.3
Nitrógeno amoniacal	35	4.1
Nitritos	0.11	0.23
Nitratos	0.47	0.14
Fósforo total	8	0.9
Grasas	50	16.6
Fe	0.89	0.09
Mn	0.058	0.003
Pb	0.073	0.006
Cd	0.047	0.003
Hg	0.001	0.0002
As	0.003	0.0005
Cr	0.032	0.006
Zn	0.181	0.04
Cu	0.052	0.002

*Desviación estándar

Fuente: Hernández, 2016

Dentro de la alcantarilla, los sólidos y los contaminantes presentes en las aguas residuales, en condiciones apropiadas pueden sedimentarse, por esta razón, la composición de los sedimentos es variada y está en función de las características de la cuenca de captación y del sistema de alcantarillado.

2.4. Efectos de los sedimentos

Los efectos principales de los sedimentos se resumen en la Tabla 2.6 y se describen a continuación:

- Susceptibilidad de los sedimentos depositados de almacenar contaminantes temporalmente, y pueden ser liberados bajo condiciones de flujos máximos, además, los procesos bioquímicos en el lecho de sedimentos pueden provocar condiciones sépticas, liberando gas que puede ser muy corrosivo para los conductos del alcantarillado.

- Los sedimentos son propensos a iniciar obstrucciones. Los sólidos grandes y bastos junto con materia orgánica pueden incrementar gradualmente su cantidad, causando la obstrucción parcial o total de la tubería, ocasionando pérdida de la capacidad hidráulica, sobrecargándose la alcantarilla o causando inundaciones (Butler y Davies, 2011).

Tabla 2.6. Efectos y consecuencias de la deposición de sedimentos de alcantarillado

Efectos	Consecuencias
Efectos ambientales	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la carga contaminante del influente a plantas de tratamiento o a cuerpos receptores. • Producción de ácido sulfhídrico y gas corrosivo.
Efectos hidráulicos	<ul style="list-style-type: none"> • Saturación de la alcantarilla. • Inundación superficial.

Fuente: Basado en Butler y Davies, 2011

2.4.1. Efectos ambientales

En los sistemas de alcantarillado combinado, los sólidos de origen sanitario se mezclan fácilmente con sedimentos de fuentes superficiales. El material orgánico tiende a adherirse a los sedimentos inorgánicos con densidades cercanas a la del agua y se deposita con ellos. Estos depósitos forman una superficie rugosa que propicia una mayor adhesión de la materia orgánica.

En virtud de lo anterior, es posible que se desarrollen condiciones anaerobias, lo que conduce a la digestión parcial del sedimento y liberación de subproductos de ácidos grasos dentro del licor intersticial con la posibilidad de que se generen cargas sustanciales de DBO y DQO. Algunas evidencias sugieren que los procesos de degradación en sedimentos pueden aumentar las cargas de contaminantes hasta en un 400% (Binnie *et al.*, 1987). En este caso, cuando se produce la erosión de sedimentos por eventos de precipitación, los efectos ocurren en el medio ambiente por descarga directa o como choque de carga en una planta de tratamiento de aguas residuales.

La presencia de depósitos de sedimentos estimula la retención de sólidos y contaminantes durante flujos bajos. Esto aumenta el potencial de la degradación de dicho material antes de ser lavado o extraído (Butler y Davies, 2011), en esta condición, los procesos microbianos contribuyen a la producción de ácido sulfhídrico y metano, estos gases representan un riesgo a la salud de los trabajadores del alcantarillado y contribuyen a la corrosión de la alcantarilla.

2.4.2. Efectos hidráulicos

La presencia de sedimento en el flujo de alcantarillas tiene tres efectos hidráulicos: disipación de energía al mantener los sólidos en suspensión, reducción del área de la sección transversal al flujo y aumento de las pérdidas debidas a la fricción a causa de la textura del lecho.

- Disipación de energía

Si se considera una alcantarilla sin lecho de sedimentos, la presencia de sólidos sedimentables en el flujo moviéndose a lo largo de la plantilla de la tubería, provoca un pequeño aumento en la pérdida de energía, y esto ocasiona una reducción en la capacidad de descarga de aproximadamente 1% para tuberías rugosas (Ackers *et al*, 1996).

Para flujos en alcantarillas en las que existe un lecho de sedimentos, las pérdidas de energía asociadas con mantener a los sólidos sedimentables en movimiento son relativamente insignificantes comparadas con los otros efectos hidráulicos.

- Reducción del área de la sección transversal al flujo

Un lecho de sedimentos reduce el área de la sección transversal disponible para transportar el flujo, por lo que aumenta la velocidad y la pérdida de energía para una descarga dada. La pérdida de área total es relativamente pequeña (<2%), en el entendido de que la profundidad de sedimentos es menor de 5% del diámetro de la tubería, pero llega a ser importante cuando se tienen tirantes de sedimentos por arriba del 10%. La pérdida de la capacidad hidráulica debida a un lecho depositado puede variar considerablemente con las condiciones de flujo (Ackers *et al*, 1996).

- Aumento de la fricción

El incremento de la resistencia global provocada por la textura rugosa del lecho de sedimentos es de mayor importancia que la reducción del área de la sección transversal de la alcantarilla. Por encima del umbral de movimiento, el sedimento forma rápidamente ondulaciones y dunas que inicialmente crecen en tamaño conforme la velocidad de flujo aumenta. El valor de rugosidad efectiva de las dunas k_s puede alcanzar 10% o más de la rugosidad efectiva de la tubería, en comparación con los valores típicos para las paredes de la tubería que están en el intervalo de 0.15 mm a 6 mm (dependiendo del material). El valor de k_s puede estimarse (May, 1993) a partir de:

$$k_s = 5.62R^{0.61}d_{50}^{0.39}$$

Ecuación 2.1

Donde:

K_s = Rugosidad efectiva (m)

R = Radio hidráulico (m)

d_{50} = Diámetro de la partícula del sedimento, mayor al 50% (en masa) de todas las partículas en el lecho (m)

Considerando los tres efectos hidráulicos antes mencionados, la Figura 2.4 representa la capacidad que tiene una alcantarilla de transportar un gasto con diferentes porcentajes de sedimentos y con diferentes tirantes de agua. En dicha Figura 2.4, el eje Y representa la relación del tirante de agua residual (d) al total del diámetro de la alcantarilla (D), y el eje X representa la relación del gasto transportado con respecto al gasto que puede transportar la alcantarilla. Así pues, un tirante del 10% de sedimentos podría reducir la capacidad total de la tubería en un 23%.

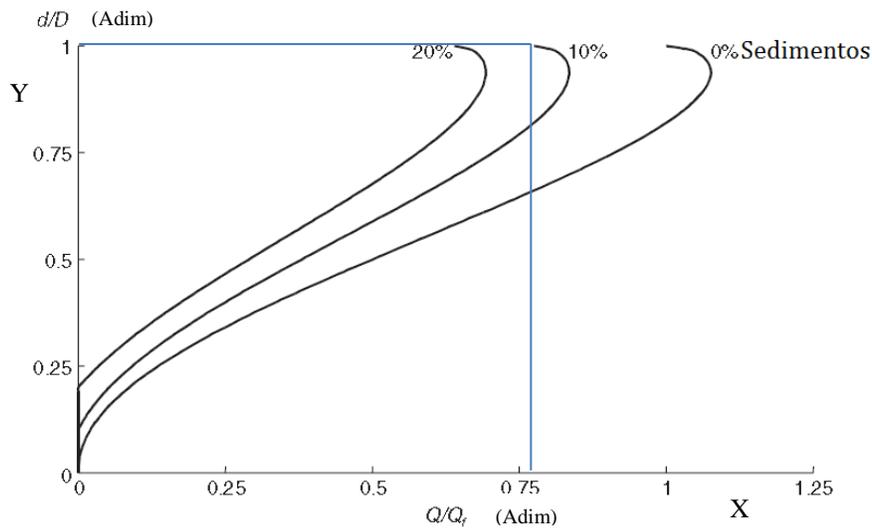


Figura 2.4. Efecto del lecho de sedimentos en la capacidad de flujo de las alcantarillas

Fuente: Butler y Davies, 2011

2.5. Transporte de sólidos en alcantarillas

En el transporte de sólidos en las alcantarillas, es posible distinguir tres fases principales: a) arrastre, b) transporte y c) deposición.

2.5.1. Arrastre

Cuando las aguas residuales fluyen en una alcantarilla, sobre el lecho de sedimentos, el esfuerzo cortante puede ser capaz de levantar y transportar los sedimentos, sin

embargo, si dicha fuerza no excede a la fuerza de gravedad, de trabazón y de cohesión, los sedimentos permanecerán en su lugar, como se ilustra en la Figura 2.5 (Butler y Davies, 2011), por lo contrario si el esfuerzo cortante excede a la fuerza de gravedad, de trabazón y de cohesión, los sedimentos serán transportados por el flujo del agua.

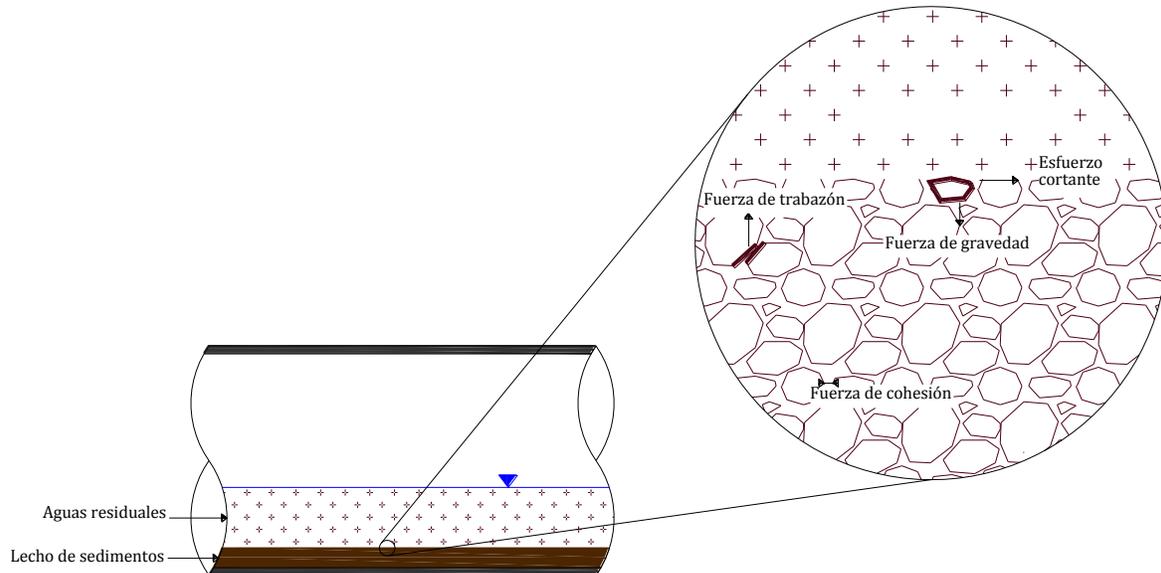


Figura 2.5. Fuerzas hidrodinámicas que se ejercen sobre las partículas

Fuente: Con base en Butler y Davies, 2011

En alcantarillas pluviales, los sedimentos son principalmente inorgánicos y no cohesivos, aunque algunos depósitos pueden ser cementantes y volverse permanentes si no son removidos por períodos largos. Los sedimentos en las alcantarillas sanitarias generalmente tienen propiedades cohesivas debido a la naturaleza de las partículas y a la presencia de grasas y lodos biológicos. En alcantarillas combinadas, los sedimentos tienden a ser una combinación de los primeros dos tipos (Butler y Davies, 2011).

2.5.2. Transporte

Una vez iniciado el movimiento, los sólidos se desplazan en suspensión o como carga de lecho. El material más fino y ligero tiende a viajar en suspensión influenciado primeramente por fluctuaciones turbulentas del flujo, que a su vez dependen del efecto de cizallamiento del lecho. El material con mayor densidad a la del agua viaja rodando, deslizándose o saltando a lo largo de la plantilla de la tubería (lecho de sedimentos), como carga de lecho. En una red de alcantarillado urbano, con materiales de diferente densidad, se da una combinación de estas formas de transporte (Ackers *et al.*, 1996).

2.5.3. Deposición

Si la velocidad del flujo o el nivel de turbulencia disminuyen, habrá una reducción en la cantidad de sólidos en suspensión debido a la sedimentación. El material acumulado en el lecho puede seguir transportándose como una corriente de partículas sin deposición, sin embargo, por abajo de un cierto límite de la velocidad, los sólidos volverán a depositarse dentro de las tuberías, ocurriendo el transporte solo en la capa superior (el límite de deposición). Si la velocidad de flujo se reduce posteriormente, el transporte de sólidos cesará completamente (el umbral del movimiento), en este caso, las velocidades de flujo ya no tienen capacidad de levantar las partículas de sedimento (Ackers *et al.*, 1996).

2.5.4. Transporte de lechos de sedimentos

Si una alcantarilla inicialmente limpia (parcialmente llena) se somete a un flujo cargado de sólidos transportados bajo el modo de lecho, pero las condiciones no son suficientes para evitar la deposición, se desarrollará un lecho de sedimentos. Entonces aumentará la fricción, provocando un aumento en el tirante del flujo y una disminución en la velocidad (Butler y Davies, 2011).

Una reducción en la velocidad causará una reducción de la capacidad del flujo para transportar sólidos y que conducirá a la deposición adicional y posiblemente a la obstrucción. Sin embargo, en realidad las pruebas de laboratorio han demostrado que la presencia del lecho depositado permite que el flujo pueda adquirir una mayor capacidad para el transporte de sólidos como carga de fondo (May, 1993).

2.6. Características de los sólidos

Las características de los sólidos de alcantarillado varían ampliamente según el tipo de sistema (para aguas residuales, para aguas pluviales o combinado), la ubicación geográfica, la naturaleza de la cuenca, las prácticas de operación, historia y costumbres. Tales características han sido estudiadas por Cabtree (1989); Chebbo (1992); Butler *et al.* (1992); Chebbo y Bahoc (1992); Xanthopoulos y Augustin (1992); Michelbach (1995); Ristenpart (1995); Verbanck (1995); Ashley *et al.* (1999). Estos estudios se han enfocado principalmente en los sólidos depositados y en los sólidos en movimiento dentro de la alcantarilla.

A continuación se describen las características de los sólidos depositados y de los sólidos en movimiento en los subcapítulos 2.1.6 y 2.1.7 respectivamente.

2.6.1. Características de los sólidos depositados

Crabtree (1989) determinó que el origen, naturaleza y ubicación de los sedimentos que se encuentran dentro de los sistemas de alcantarillado del Reino Unido y los clasifica en cinco categorías A-E (Figura 2.6).

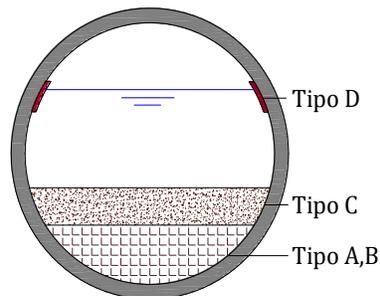


Figura 2.6. Sedimentos típicos en una alcantarilla

Fuente: Crabtree, 1989

Los sedimentos de tipo A y de tipo C son las fuentes más importantes de contaminantes, ya que la re-suspensión de los sedimentos de tipo A puede ser la causa de las altas cargas de contaminación asociadas a eventos extremos de precipitación. Los sedimentos de tipo C corresponde al material lavado durante eventos promedio de tormentas en muchos sistemas de alcantarillado. Los sedimentos tipo A, tipo B y tipo C son los más significativos en términos de restricción de los flujos en el alcantarillado, por lo que su remoción y extracción son necesarias para la operación del sistema (Crabtree, 1989).

Las características de estos depósitos se describen en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Características físicas y químicas de los sedimentos de una alcantarilla por tipo

	Tipos de sedimento				
	A	B	C	D	E
Descripción	Material grueso, suelto, granular	Como A, pero cementado un poco, con grasas, alquitranes, etc.	Depósitos de grano fino	Limos orgánicos y bio películas,	Depósitos de grano fino
Localización	Plantilla de la tubería	Plantilla de la tubería	Zonas de reposo, solos o por encima de un material	Pared de la tubería alrededor de la línea de flujo	En coladeras pluviales
Densidad aparente saturada (kg/m ³)	1720	Sin datos	1170	1210	1460
Sólidos totales (%)	73.4	Sin datos	27	25.8	48
DQO (g/kg)*	16.9	Sin datos	20.5	49.8	23
DBO ₅ (g/kg)*	3.1	Sin datos	5.4	26.6	6.2
NH ₄ -N (g/kg)*	0.1	Sin datos	0.1	0.1	0.1
Contenido orgánico (%)	7	Sin datos	50	61	22
Grasas y aceites (%)	0.9	Sin datos	5	42	1.5

*Gramos del parámetro por kilogramo de sedimento grueso mojado

Fuente: Crabtree, 1989

➤ Características físicas

El material tipo A es el más grueso, se encuentra normalmente en las plantillas de las alcantarillas, estos depósitos tienen una densidad de hasta 1,800 kg/m³, contenido orgánico del 7% y 6% de partículas menores a 63 micras, el material tipo B tiene las mismas características del material tipo A pero más cementado, este material se encuentra en tuberías de diámetro mayor a 1 m. El material más fino (tipo C) es 50% orgánico, tiene una densidad de aproximadamente 1,200 kg/m³ y aproximadamente el 45% de las partículas son menores a 63 micras. El depósito tipo E es el material más fino, aunque no existe una frontera definida entre cualquiera de los tipos A, B, C o E, esto es quizás de esperarse, ya que el sedimento depositado en realidad dependerá del material disponible para el transporte y de las condiciones de flujo en puntos específicos (Crabtree, 1989).

En la Figura 2.7 se muestra la granulometría obtenida del análisis de las muestras de aguas residuales, carga de fondo (tiempo seco), sedimentos de colectores, atarjeas e interceptores de la ciudad de Dundee, U.K (Ashley y Crabtree, 1992).

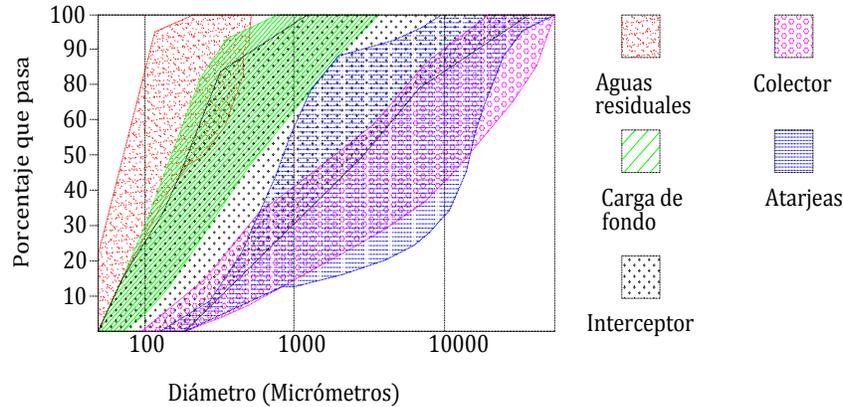


Figura 2.7. Granulometría de los sedimentos de atarjeas, colectores e interceptores

Fuente: Ashley y Crabtree, 1992

➤ **Características químicas**

En la Tabla 2.8 se muestran las principales características químicas de los sedimentos. En ella se observa una variabilidad alta en la concentración de contaminantes. Los líquidos viscosos de la pared (tipo D) son los más contaminantes en términos de la demanda química de oxígeno (193 gDQO/kg de sedimento húmedo). También se observa un decremento de la concentración entre los tipos, en el orden D, C, E y A, teniendo en el material tipo A una DQO promedio de 23 gDQO/kg. Sin embargo, estos valores no muestran el potencial contaminante relativo de cada tipo de depósito (Crabtree, 1989).

Tabla 2.8. Resumen de los resultados de los análisis químicos de los sedimentos en alcantarillado

Parámetro contaminante	Tipo de sedimento*				
	A	C	D	E	
DQO	Normal	26	5	6	12
	Promedio	23	76	193	48
	CV (%)	63	23	83	70
DBO ₄ horas	Normal	19	4	6	12
	Promedio	0.4	1.8	1.6	0.9
	CV (%)	76	87	69	67
DBO ₅ días	Normal	26	5	6	12
	Promedio	4.2	20	103	13
	CV (%)	91	51	95	61
Contenido orgánico (%)	Normal	44	5	5	12
	Promedio	7	50	61	22
	CV (%)	77	47	54	77
Grasas y aceites (%)	Normal	11	4	4	12
	Promedio	0.9	5	42	1.5
	CV (%)	20	125	57	71

*Gramos del parámetro por kilogramo de sedimento grueso mojado

CV: Coeficiente de variación

Fuente: Crabtree, 1989

La carga contaminante total sólo sería liberada bajo condiciones de flujo de tormenta extraordinaria, capaz de remover todos los depósitos de sedimentos. Eventos rutinarios de tormenta probablemente removerían sólo una fracción de los depósitos del tipo A. Es pertinente hacer notar que, en este caso, el agua residual por sí misma solo representa 10% del potencial de la carga contaminante (Butler y Davies, 2011).

Los datos registrados en la ciudad de Dundee, Reino Unido, (Tabla 2.9) muestran diferencias significativas en las concentraciones de sólidos y amoníaco en los flujos de tiempo seco. El pico de concentración de sólidos volátiles se produjo durante los períodos de deshielo, también se observó que las concentraciones son mayores durante tormentas (Ashley y Crabtree, 1992).

Tabla 2.9. Características químicas de los sedimentos de un interceptor en verano e invierno

Estación del año		Sólidos volátiles (%)	DQO (mg/kg)*	NH ₄ -N (mg/kg)	DBO (mg/kg)
Verano	Promedio	5.5	8534	87.6	582
	Máximo	61.9	27855	1120	24500
	Mínimo	0.2	870	2.1	210
Invierno	Promedio	2.9	12093	132	Datos insuficientes
	Máximo	19.3	63502	878	
	Mínimo	0.2	508	14.8	

* mg/kg de sólidos secos

Fuente: Ashley y Crabtree, 1992

➤ Cualidades de los tipos de sedimentos

Los sedimentos tipo A y B se asocian normalmente con la pérdida de la capacidad de flujo de la alcantarilla; los depósitos de tipo C son la fuente más significativa de contaminantes. La naturaleza de los sedimentos parece variar entre áreas, encontrando grandes depósitos orgánicos cerca de las cabezas de atarjea y material granular (tipo A) en colectores troncales. Las alcantarillas interceptoras grandes suelen tener material de tipo C entremezclado con el de tipo A. Los líquidos viscosos de la pared de la tubería (tipo D) son importantes porque son muy comunes, fácilmente erosionables, con altas concentraciones de contaminantes y afectan la rugosidad hidráulica. Los sedimentos tipo E son los principales causantes de inundaciones en periodos de lluvia (Ashley y Crabtree, 1992).

2.6.2. Características de los sólidos en movimiento

➤ Sólidos en suspensión

Las partículas en suspensión predominantes durante los flujos en tiempo seco y húmedo son de aproximadamente 40 micras de diámetro, y se atribuyen principalmente a los sólidos sanitarios. Del material suspendido en el flujo del alcantarillado combinado, la mayor parte es orgánico y bioquímicamente activo, con capacidad para absorber contaminantes (Crabtree *et al.*, 1991).

➤ Sólidos cercanos al lecho

Bajo condiciones de flujo en tiempo seco, las partículas sólidas pueden formar una capa móvil de alta concentración o “corriente de fondo densa” justo por encima del lecho de sedimentos (Figura 2.8). En esta región los sólidos son partículas relativamente grandes (> 0.5 mm), orgánicas ($> 90\%$) y se cree que están atrapadas en una matriz de flujo suspendido (Verbanck, 1995). Las concentraciones de sólidos son de hasta 3500 mg/l y también los correspondientes contaminantes orgánicos son particularmente concentrados (Ashley y Crabtree, 1992). Según Ashley *et al.* (1994), el 12% de los sólidos totales son transportados en el material que se mueve cerca del lecho.

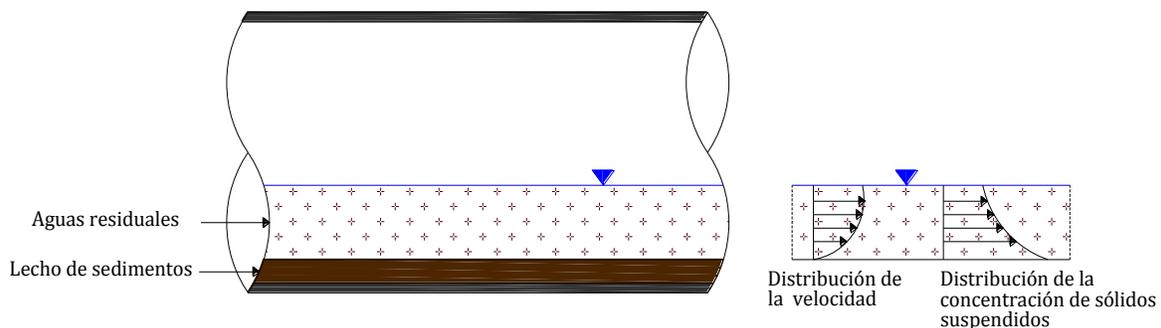


Figura 2.8. Velocidades y distribución de sedimentos suspendidos en tiempo seco

Fuente: Ashley *et al.*, 1994

➤ Sólidos de carga de lecho

Las partículas granulares (2-10 mm) se transportan como carga de lecho sólo en alcantarillas con pendiente mayor al 2%. Se observa poco material granular en movimiento en las secciones planas ($< 0.1\%$), debido a que se deposita (Ashley y Crabtree, 1992).

En una investigación realizada por Bertrand-Krajewski *et al.* (1993) se determinó que las partículas más pequeñas tienden a estar asociadas con una proporción mayor de contaminantes de la que podría esperarse a partir de su área superficial

(Tabla 2.10). Lo mismo sucede con los sedimentos móviles del alcantarillado.

Tabla 2.10. Porcentaje de carga de contaminación total asociada con diferentes fracciones de tamaño de partícula

Contaminante	Fracción de tamaño de las partículas (μm)		
	<50	50-250	>250
DBO	52%	20%	28%
DQO	68%	4%	28%
NTK	16%	58%	26%
Hidrocarburos	69%	4%	27%
Plomo	53%	34%	13%

Fuente: Bertrand-Krajewski *et al.*, 1993

Capítulo III. Metodología para la evaluación del impacto ambiental del manejo de los sedimentos extraídos de redes de alcantarillado urbano

Se dice que hay un impacto ambiental cuando una acción produce una alteración en el medio o en algunos de sus componentes, por lo tanto, el objetivo de la evaluación de impacto ambiental es la cuantificación de dicha alteración. En cierto modo el concepto “alteración” es relativo, puesto que la alteración puede ser positiva o negativa, grande o pequeña, etc. Cuando se emplea el término deterioro ambiental o degradación ambiental, ya se va concretando algo más, si bien se sigue usando un término también relativo (Estevan, 1977).

Los estudios de impacto ambiental consisten en evaluar las consecuencias de una acción para determinar los efectos sobre los cuales. Por otra parte, se denomina evaluación de impacto ambiental al procedimiento para la valoración de impactos que se producen sobre el ambiente debido a una obra o actividad (Garmendia *et al.*, 2005).

Al comparar entre varios autores, la metodología de impacto ambiental resulta que son similares entre ellas, y en todos los casos se considera que el proyecto se encuentra en la etapa de planeación. Debido a que la presente tesis se refiere a una actividad desarrollándose, se adaptó la metodología propuesta por Rau (1980).

Para la evaluación de impacto ambiental referente al manejo de los sedimentos extraídos de redes de alcantarillado urbano, la metodología se dividió en tres etapas:

1. Identificación de impactos
2. Valoración de impactos
3. Prevención de impactos

Cada una de estas etapas incluye diferentes fases como se muestra en la Figura 3.1.

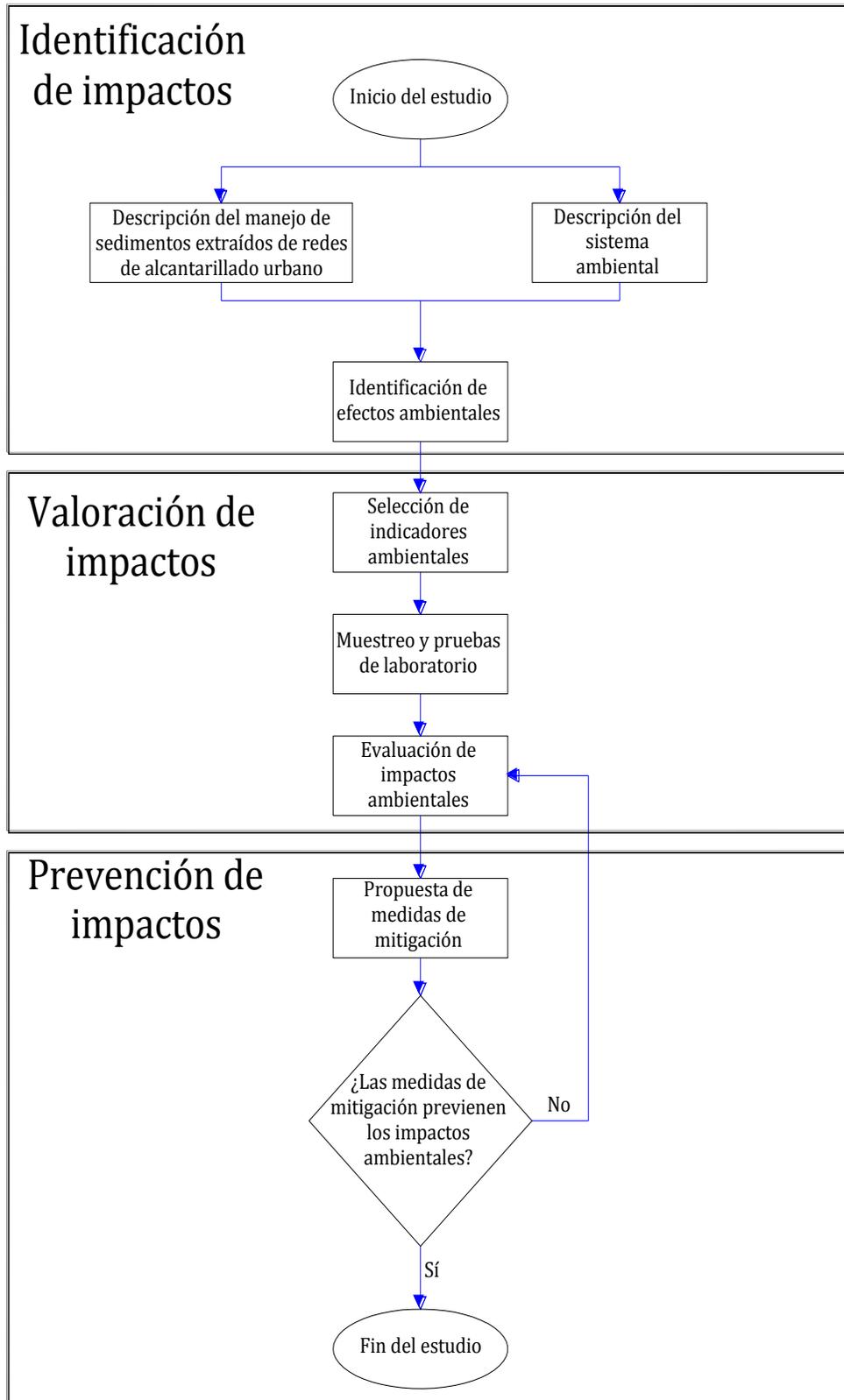


Figura 3.1. Metodología para la evaluación del impacto ambiental

Fuente: Adaptado de Rau, 1980

El proceso general incluyó los siguientes pasos:

Descripción del manejo de sedimentos extraídos de redes de alcantarillado urbano: consistió en revisar la actividad en estudio, destacando, con enfoque ambiental, sus principales características y daños más evidentes.

Descripción del sistema ambiental: consistió en el examen de los medios biótico y abiótico, sustentado tanto en evidencias reportadas en la literatura especializada como en observaciones directas en campo; en esta fase se incluyó el estudio del medio social. En la sección 3.2 se describe más ampliamente esta fase.

Identificación de efectos ambientales: se entiende por efecto ambiental al cambio en algún elemento ambiental producido por una acción. La fase consistió en identificar las relaciones causa – efecto entre el manejo de los sedimentos y los factores ambientales, con el propósito de facilitar la evaluación de los impactos ambientales.

Selección de indicadores ambientales: se entiende por indicador ambiental a la característica de una actividad humana que se puede relacionar con su viabilidad ambiental o con los impactos que produce. La selección de indicadores ambientales fue extremadamente importante dado que determinó el nivel de detalle que se desarrolló durante la evaluación de impacto ambiental. Los indicadores ambientales seleccionados fueron cuantitativos. En la sección 3.4 se describe esta etapa.

Muestreo y pruebas de laboratorio: el propósito de esta fase fue proporcionar descripciones cuantitativas de cada indicador mediante programas de muestreo en campo y el análisis de las muestras para identificar el tipo de alteraciones que se producen en los factores ambientales. El muestreo fue un procedimiento destinado a la estimación no sesgada de los parámetros estadísticos de una población como por ejemplo, su media y su varianza. Se abordará esta etapa en la sección 3.5.

Evaluación de impactos ambientales: con esta fase, el estudio alcanzó uno de sus objetivos más importantes, se trató de determinar las repercusiones que tiene el manejo de sedimentos sobre el ambiente descrito y sobre sus elementos más significativos. Cada impacto fue valorado sobre una base lógica, medible y fácilmente identificable. Posteriormente, el análisis permitió identificar, valorar y medir el efecto acumulativo del total de los impactos identificados. En la sección 3.6 se describe la técnica utilizada para estudiar y evaluar los impactos ambientales.

Propuesta de medidas de mitigación: las medidas de mitigación son el conjunto de modificaciones de la actividad en estudio que reducen su impacto final. Dichas medidas pueden ser compensatorias, correctoras y protectoras. La importancia de esta etapa fue evidente, ya que el propósito de analizar el impacto de una acción es modificarla para anular, corregir o atenuar dicho impacto.

3.1. Descripción del manejo de sedimentos extraídos de redes de alcantarillado urbano

Este apartado se refiere a la descripción de las acciones, especificando los elementos y procesos involucrados, en términos medioambientales, que están causando o que pueden llegar a ser causantes de un impacto en el medio.

A partir de esta descripción detallada del manejo de sedimentos, se elaboró una lista de las acciones susceptibles de producir impactos. Éstas se ordenaron de forma jerárquica en un árbol de acciones. De entre todas las acciones del manejo de sedimentos se seleccionaron únicamente aquellas que causan efectos ambientales, tanto adversos o benéficos, ya que se analizó su posible relación con los factores ambientales seleccionados (ver sección 3.2), para así identificar y valorar los posibles impactos.

Los criterios considerados en esta fase de la metodología fueron los siguientes:

1) Exponer todas las acciones que causan un impacto en el medio. 2) Evitar en lo posible hacer descripciones detalladas de aspectos del manejo de sedimentos que no tuvieran relevancia en la determinación de impactos, y 3) No se omitió información técnica de importancia ambiental hablando. Esta última situación se dio en ocasiones con los posibles impactos en el medio socio-económico al utilizar las vialidades existentes, que quedan saturadas por el aumento de tráfico que produce la actividad. Este tipo de datos también tienen una influencia en la modificación de la calidad ambiental de la zona.

En este apartado se abordó por separado la descripción de las acciones susceptibles de provocar impactos que se realizan en el manejo de sedimento, ya que éstas afectan al medio de forma distinta; con base en las observaciones de campo para dicho apartado se propusieron las siguientes acciones:

- 1.- Extracción de sedimentos de la alcantarilla
- 2.- Almacenamiento temporal de sedimentos extraídos
- 3.- Transporte de sedimentos
- 4.- Desección de sedimentos
- 5.- Disposición final de sedimentos

En ocasiones, dos acciones causaron el mismo tipo de efecto ambiental. En estos casos, se describieron ambas acciones, ya que no implican la una a la otra y la combinación del efecto de ambas acciones dio lugar a un efecto acumulado o sinérgico mayor que el de una de ellas. Por ejemplo, esto ocurrió al sumar las emisiones de gases de los equipos de malacates, y el tráfico rodado que se produce durante la fase de transporte de sedimentos.

Las acciones, además, fueron fácilmente determinables, lo que implicó que se localizaran físicamente en una zona, donde causaron su efecto, así como en el momento temporal en que se desarrolló.

Por último, las acciones que se eligieron fueron medibles mediante indicadores y en las unidades correspondientes, para conocer de forma cuantitativa el efecto ambiental que causaron.

3.2. Descripción del sistema ambiental

La descripción del sistema ambiental o inventario ambiental permitió identificar y valorar los posibles impactos que el manejo de sedimentos está provocando. Para que este objetivo quedará cubierto adecuadamente se requirió conocer las características del medio y su calidad ambiental, para valorar cómo se ha modificado dicha calidad ambiental y la contribución de la actuación en estudio. Por lo tanto, fue necesario realizar una descripción del estado con actuación, así como una interpretación del estado sin actuación, para tener una referencia con respecto a la cual se puedan estimar los efectos de ésta.

Al evaluar la actuación en estudio fue pertinente diferenciar entre los factores ambientales relevantes y los que no lo son. Las características de un elemento o factor ambiental relevante para un estudio de impacto ambiental son las siguientes:

1. Puede ser afectado por la actuación.
2. Se considera valioso por criterios sociales, científicos, etcétera.

Los resultados obtenidos en esta fase del análisis se citan a continuación:

- De cada elemento ambiental se realizó una descripción del estado actual.
- Se hicieron valoraciones de la calidad ambiental de cada elemento y de todo el medio en su conjunto.
- Se realizó un árbol de los factores ambientales afectados por el manejo de sedimentos.

3.3. Identificación de los efectos ambientales

Esta fase consistió en identificar las relaciones causa – efecto entre las acciones del manejo de sedimentos y los factores ambientales señalados como relevantes en la fase anterior. Cada relación causa – efecto identificó un impacto cuya trascendencia se estimó después. Dichas relaciones no son simples sino que frecuentemente hay una cadena de efectos primarios, secundarios, inducidos, etc., que inician en la acción y terminan en los seres vivos, en los bienes materiales y, en suma, en los seres humanos (César, 2007).

Para identificar los impactos ambientales, se empezó del conocimiento de la acción que se está evaluando y del estudio del medio. Esto se puede llevar a cabo con distintos

niveles de detalle, utilizando diferentes técnicas como son las listas de verificación, las matrices de causa – efecto y los diagramas de redes. La técnica más sencilla consiste en analizar una lista de verificación de factores ambientales para detectar aquellos que pueden ser afectados por la acción, sobre los que se producirán impactos y cuáles no son afectados o en caso de serlo, su grado de afección, ya que pueden considerarse efectos ambientales no significativos y no ser estudiados con más detalle. El segundo nivel de detalle consiste en realizar una red que relacione cada acción con los factores afectados y estos entre sí. También se puede disponer una matriz de cruce entre los factores ambientales obtenidos en la lista de verificación y las acciones de la actividad para reflexionar sobre ella e identificar los impactos. El tercer nivel de detalle consiste en efectuar la matriz de cruce entre factores ambientales y acciones del proyecto, obtener la lista de impactos y realizar una valoración cualitativa de ellos.

Dado lo anteriormente expuesto, en la presente tesis se llevó a cabo el tercer nivel de detalle por lo que se realizó una valoración de impactos.

Toda valoración, por definición, es subjetiva, lo cual no significa que tenga que ser arbitraria. Las distintas valoraciones de efectos intentan disminuir la subjetividad de las conclusiones justificando de la mejor manera posible todos los juicios de valor que se realizan. En las técnicas de valoración cualitativa se valoran de manera subjetiva, aunque el resultado obtenido sea numérico, una serie de cualidades de los impactos, asignando valores prefijados según esa cualidad sea alta, media o baja. La razón para llamar así a esta valoración cualitativa es que refleja, de alguna manera la importancia del impacto, midiendo la trascendencia de la acción sobre el factor alterado mediante los siguientes atributos:

Acumulación (A)

Se distinguió entre efectos simples, acumulativos o sinérgicos según la forma de interaccionar con otros efectos.

- Efecto simple es aquél que se manifiesta sobre un solo componente ambiental o cuyo modo de acción es individualizado, sin consecuencias en la inducción de nuevos efectos, ni en la de su acumulación, ni en la de su sinergia.
- Efecto acumulativo es aquél que al prolongarse en el tiempo la acción del agente inductor, incrementa progresivamente su gravedad, al carecerse de mecanismos de eliminación con efectividad temporal similar a la del incremento del agente causante del daño.
- Efecto sinérgico es aquél que se produce cuando el efecto conjunto de la presencia simultánea de varios agentes supone una incidencia ambiental mayor que el efecto suma de las incidencias individuales contempladas aisladamente. Asimismo, se incluye en este tipo aquel efecto cuyo modo de acción induce en el tiempo la aparición de otros nuevos (Garmendia *et al.*, 2005).

Intensidad (In)

Por la intensidad o grado de destrucción del factor ambiental se clasificaron los impactos en alta, si la destrucción del factor fue completa, media si fue elevada, baja si fue muy pequeña.

Extensión (Ex)

Si la medida del impacto se realiza por la extensión de la superficie afectada se dice que puede ser puntual, parcial o extensivo y considerar incluso si la ubicación es crítica.

Persistencia (P)

Trata de las características del impacto con relación al tiempo:

- Efecto permanente es aquél que supone una alteración indefinida en el tiempo de factores ambientales predominantes en la estructura o en la función de los sistemas de relaciones ecológicas o ambientales presentes en el lugar.
- Efecto temporal es aquél que supone alteración no permanente en el tiempo, con un plazo temporal de manifestación que puede estimarse o desestimarse (Garmendia *et al.*, 2005).

Reversibilidad (Rv)

La definición del concepto de reversibilidad habla de procesos naturales y de medio plazo. Es decir, que de forma natural, al cesar la acción, el medio sea capaz de eliminar el efecto antes de cinco años.

- Efecto reversible es aquél en donde la alteración puede ser asimilada por el entorno de forma medible, a medio plazo, debido al funcionamiento de los procesos naturales de la sucesión ecológica y de los mecanismos de autodepuración del medio.
- Efecto irreversible es aquél que supone la imposibilidad, o la “dificultad extrema”, de retornar, por medios naturales, a la situación anterior a la acción que lo produce (César, 2007).

Recuperabilidad (Rc)

- Efecto recuperable es aquél en donde la alteración que supone puede eliminarse, bien por la acción natural, bien por la acción humana, y, asimismo, aquel en que la alteración que supone puede ser reemplazable.
- Efecto irrecuperable es aquél en que la alteración o pérdida que supone es imposible de reparar o restaurar, tanto por la acción natural como por la humana (Garmendia *et al.*, 2005).

Para realizar la valoración cualitativa fue necesario asignar un valor a cada atributo. En la Tabla 3.1 se muestran dichos valores.

Tabla 3.1. Valores de los atributos de los impactos

Extensión (Área de influencia)		Acumulación	
Puntual	1	Simple	1
Parcial	2	Acumulativo	3
Extenso	3	Sinérgico	5
Persistencia (Permanencia del efecto)		Intensidad (Grado de destrucción)	
Temporal	1	Baja	1
Permanente	3	Media	4
		Alta	8
Recuperabilidad (Medios humanos)		Reversibilidad(Medios naturales)	
Recuperable	1	Reversible	1
Irrecuperable	3	Irreversible	3

Fuente: Garmendia *et al.*, 2005

El interés de las técnicas de identificación de impactos estribó en que constituyen una primera aproximación al problema, ya que se consideraron los impactos únicamente desde un punto de vista eminentemente descriptivo, para que sea más fácil su comprensión.

3.4. Selección de indicadores ambientales

Sobre el concepto de indicador, una definición genéricamente utilizada, establece que es un elemento del medio ambiente afectado, o potencialmente afectado, por un agente de cambio (Ramos, 1987). Los indicadores de impacto deben cumplir, al menos, los siguientes requisitos:

- a) Representatividad: se refiere al grado de información que posee un indicador respecto al impacto global de la actividad en evaluación.
- b) Relevancia: aporta información es significativa sobre la magnitud e importancia del impacto.
- c) Excluyente: no existe una superposición entre los distintos indicadores.
- d) Cuantificable: medible siempre que sea posible en términos cuantitativos.
- e) Fácil identificación: definidos conceptualmente de modo claro y conciso.

La utilización de un indicador supone la aceptación del marco teórico en el que se encuadra y de ciertas hipótesis que muchas veces no están suficientemente contrastadas. Como ejemplos de indicadores ambientales se puede mencionar la concentración de metales pesados en los sedimentos, la toxicidad de los sedimentos o la concentración de determinados contaminantes.

Los indicadores ambientales que se utilizaron para determinar la calidad ambiental o el cambio de calidad ambiental asociado a una determinada acción, se denominan indicadores de impacto ambiental. Por lo que una vez seleccionados los indicadores de

impacto ambiental, se redactó una descripción detallada de su comportamiento, dejando claro los supuestos teóricos que se asumieron.

Desde un punto de vista práctico, los indicadores se pueden clasificar de la siguiente manera: de alarma, de sensibilidad y de integración.

Los indicadores de alarma o de aviso, consisten en variables que si superan un cierto valor, permiten presumir un cambio apreciable de la calidad ambiental, por ejemplo, el aumento de la concentración de un contaminante por encima de los niveles permitidos por la normativa. Se requiere fijar un umbral admisible para cada indicador y el límite a partir del cual se considera que el cambio ambiental es apreciable y, por tanto, es necesario actuar para contrarrestarlo.

Los indicadores de sensibilidad, están muy relacionados con las variables que se desean medir. Por ejemplo, el número de horas que se usa un motor sirve de estimación para la cantidad de CO₂ emitido. Todos los indicadores de sensibilidad, son en realidad indicadores de los valores reales.

Por su parte, los indicadores de integración, son los que sirven para valorar la función de un ecosistema en su conjunto o al menos en parte. Muchas de las variables paisajísticas entran en esta categoría.

En este trabajo se seleccionaron principalmente indicadores de alarma.

3.5. Muestreo y pruebas de laboratorio

El propósito de esta fase de la investigación fue proporcionar descripciones cuantitativas de cada indicador mediante programas de muestreo en campo y el análisis de los sedimentos para identificar el tipo de alteraciones que se pueden producir en los factores ambientales.

El objetivo general del muestreo fue la recolección de muestras representativas para obtener las características físicas, químicas y biológicas de los sedimentos, tomadas bajo criterios de control y aseguramiento de calidad. La veracidad de los resultados obtenidos en los análisis no sólo dependió del manejo de las muestras en el laboratorio y de la calidad con que éstas fueron procesadas, sino de forma muy importante del muestreo. En la recolección de muestras se tomaron en cuenta factores tales como: homogeneidad de la muestra, volumen colectado, método de muestreo y buenas prácticas.

3.5.1. Campaña de muestreo

En la Ciudad de México el desazolve de alcantarillas se realiza mediante camiones hidroneumáticos y equipos de malacates. En las redes de atarjeas los sedimentos se extraen empleando camiones hidroneumáticos, por lo que son mezclados con aguas residuales; además, debido a que el equipo dispone de un tanque de residuos de gran capacidad, es posible succionar los azolves en muchos sitios de la red de atarjeas, de tal manera que no es posible asegurar que al coleccionar una muestra del tanque de residuos, corresponda a un lugar o área específica. Se emplea la técnica de malacates en el desazolve de la red de colectores, esta técnica permite extraer principalmente sedimentos, y se puede tomar una muestra específica de un sitio seleccionado. En virtud de lo anterior, en la investigación se consideró que los sedimentos extraídos de los colectores son representativos y corresponden a un área de drenaje mayor, por esta razón, se realizó el muestreo de sedimentos con el empleo de los equipos de malacates.

No obstante que se pretendía determinar los sitios de muestreo de manera aleatoria, la forma en que el SACMEX realiza el desazolve de acuerdo a un programa anual, motivó que el muestreo fuese de tipo determinístico, es decir, se conocía la ubicación de los puntos de muestreo de acuerdo con el programa de trabajo y, dado que se dependía de la disponibilidad de los equipos de malacates, las muestras se tomaron en los lugares en donde se realizó el desazolve durante septiembre y octubre del 2015.

En la Figura 3.2 se muestran los 9 sitios de muestreo de sedimentos y en la Tabla 3.2 sus coordenadas geográficas, éstas fueron obtenidas con la ayuda del programa Google Earth el cual tiene una precisión de 7 m y un nivel de confianza de 95%.



Figura 3.2. Sitios de muestreo de sedimentos en la CDMX

Fuente: Obtenida de Google Earth, 2016

Tabla 3.2. Coordenadas geográficas de los sitios de muestreo de sedimentos en la CDMX

Sitios	Coordenadas geográficas	
Sitio 1	Latitud:	19°25'24.45"N
	Longitud:	99° 5'20.30"O
Sitio 2	Latitud:	19°26'44.23"N
	Longitud:	99° 5'44.51"O
Sitio 3	Latitud:	19°29'0.57"N
	Longitud:	99° 4'12.59"O
Sitio 4	Latitud:	19°26'25.53"N
	Longitud:	99° 8'23.35"O
Sitio 5	Latitud:	19°23'6.25"N
	Longitud:	99° 9'26.28"O
Sitio 6	Latitud:	19°13'38.09"N
	Longitud:	98°57'56.97"O
Sitio 7	Latitud:	19°25'25.88"N
	Longitud:	99°12'8.54"O
Sitio 8	Latitud:	19°23'19.06"N
	Longitud:	99° 3'27.16"O
Sitio 9	Latitud:	19°33'2.21"N
	Longitud:	99° 8'53.15"O

Descripción de los sitios de muestreo localizados en la Ciudad de México

Sitio 1: Calle Asistencia Pública esquina calle Industria de Comercio y Trabajo, Colonia Federal, Delegación Venustiano Carranza.- Uso de suelo habitacional, clase socioeconómica media y comercial. En los alrededores se observaron bodegas de almacenamiento de empresas relacionadas con las actividades aeroportuarias. La alcantarilla desazolvada tiene un diámetro de 1.2 m y presentaba un tirante de 0.3 m de sedimentos.

Sitio 2: Av. Eje 2 Norte Transval esquina calle Jericó, Colonia Romero Rubio, Delegación Venustiano Carranza.- Uso de suelo habitacional, clase socioeconómica media. La alcantarilla desazolvada tiene un diámetro de 1.82 m y presentaba un tirante de 0.3 m de sedimentos.

Sitio 3: Av. Estado de Morelos esquina Estado de Nayarit, Colonia Providencia, Delegación Gustavo A. Madero.- Uso de suelo habitacional, clase socioeconómica popular y comercial. Cerca de este punto se encuentra un mercado y en la calle hay cocinas económicas y talleres mecánicos. La alcantarilla desazolvada tiene un diámetro de 1.52 m y presentaba un tirante de 0.5 m de sedimentos.

Sitio 4: Av. Eje Central Lázaro Cárdenas esquina Andador Plaza Garibaldi, Colonia Centro, Delegación Cuauhtémoc.- Uso de suelo comercial (restaurantes, cantinas, tiendas, hoteles). En este sitio los sedimentos presentaron más basura (plásticos) en comparación con los otros sitios. La alcantarilla desazolvada tiene un diámetro de 1.52 m y presentaba un tirante de 0.45 m de sedimentos.

Sitio 5: Av. Eje 1 Poniente esquina calle Eugenia, Colonia Narvarte Poniente, Delegación Benito Juárez.- Uso de suelo habitacional, clase socioeconómica media y comercial (tiendas departamentales). En este sitio los sedimentos fueron extraídos de un sifón invertido por lo que son diferentes a los de otros sitios en granulometría y concentración de contaminantes. La alcantarilla desazolvada tiene un diámetro de 1.52 m y presentaba un tirante de 0.3 m de sedimentos.

Sitio 6: Calle Canal del Norte casi esquina con Río Lerma, Colonia Barrio los Reyes, Delegación Tláhuac.- Uso de suelo habitacional y agrícola, clase socioeconómica popular rural. Este colector estaba obstruido por costales llenos de cascajo. La alcantarilla desazolvada tiene un diámetro de 1.52 m y presentaba un tirante de 0.6 m de sedimentos.

Sitio 7: Calle Bosque de Chapultepec Sección II, Colonia Lomas Virreyes, Delegación Miguel Hidalgo.- Uso de suelo habitacional, clase socioeconómica residencial. La toma de muestra en este sitio se realizó de forma diferente, un trabajador se introdujo al colector y sacó la muestra. La alcantarilla desazolvada tiene un diámetro de 0.76 m y presentaba un tirante de 0.4 m de sedimentos.

Sitio 8: Av. Constitución de Apatzingán esquina Tercera Cerrada de Av. Constitución de Apatzingán, Colonia Tepalcates, Delegación Iztapalapa.- Uso de suelo habitacional, clase socioeconómica popular y comercial (talleres mecánicos y tiendas). En este sitio los sedimentos se depositan debido a que la tubería presenta hundimientos en la parte central. La alcantarilla desazolvada tiene un diámetro de 0.45 m y un tirante de 0.3 m de sedimentos.

Sitio 9: Calle Estado de México S/N, Colonia Loma la Palma, Delegación Gustavo A. Madero.- Uso de suelo habitacional, clase socioeconómica popular. Los sedimentos de este sitio están compuestos de arcilla y contienen mucha basura, son de color café y la draga arrancó raíces que estaban dentro de la tubería. La alcantarilla desazolvada tiene un diámetro de 1.2 m y presentaba un tirante de 0.45 m de sedimentos.

Además del muestreo en los sitios descritos, se realizó un recorrido acompañando a la tripulación de un camión hidroneumático con el objetivo de observar si era conveniente recolectar muestras con esta técnica de extracción o con la de malacates. Al final del recorrido se colectó una muestra con el fin de comparar los resultados de los parámetros obtenidos de los sedimentos de redes de atarjeas y de colectores.

Se colectó una muestra por día con el fin de evitar la alteración de los sedimentos por el intemperismo o reacciones químico-biológicas; aunado a lo anterior, los trabajadores amontonan en la calle los sedimentos extraídos durante varios días, una vez amontonados los sedimentos es difícil saber cuándo fueron extraídos.

Descripción del sitio de muestreo localizado en la Ciudad de Acapulco, Guerrero

Para contar con una línea base de referencia de las características de los sedimentos de una ciudad con menos actividades económicas y, por ende, con aguas residuales de concentración débil, se solicitó apoyo a la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Acapulco para muestrear en dicha ciudad, ya que ésta cuenta con equipos de malacates para el desazolve de sus alcantarillas (Figura 3.3).



Figura 3.3. Equipo de malacates en la ciudad de Acapulco

Nota: Obsérvese que los trabajadores no portan equipo de protección personal

Los sedimentos fueron recolectados en la esquina de las calles Sonora y Flores Magón (Figura 3.4). El sitio presenta las siguientes coordenadas 16°51'42.53"N y 99°53'37.43"O.



Figura 3.4. Localización del sitio de muestreo de la ciudad de Acapulco

Fuente: Obtenida de Google Earth, 2016

Los giros económicos observados en los alrededores del sitio de muestreo son: tortillerías, taquerías, iglesias, tiendas de autopartes, auto-lavados, veterinarias, talleres mecánicos, vulcanizadoras, misceláneas y casas habitación.

Tipos de sedimentos muestreados

El Dr. Crabtree realizó en 1989 un estudio de caracterización de sedimentos cuyos resultados le condujeron a clasificar los sedimentos de las alcantarillas en cinco categorías A-E (Ver apartado 2.6.1). Para contrastar las categorías observadas por el Dr. Crabtree con el perfil de sedimentos de las alcantarillas muestreadas en las ciudades de México y Acapulco, en cada punto se tomaron dos muestras, tratando de discriminar los sedimentos del fondo de los superficiales. En la Figura 3.5 se muestran los estratos que se tomaron y la nomenclatura que se asignó a cada categoría.

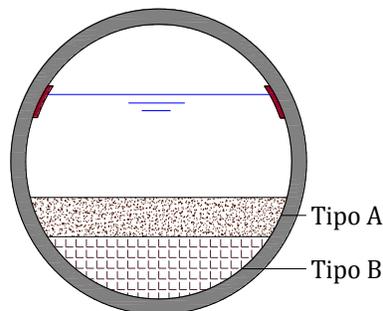


Figura 3.5. Estratos muestreados en las ciudades de México y Acapulco

Consideraciones durante la toma de muestras

Antes de empezar el muestreo se realizó una revisión bibliográfica relacionada con residuos peligrosos con el objetivo de prever los riesgos a la salud de las personas involucradas en el muestreo. Se encontró que Jiménez *et al.* (2004) realizó la prueba CRETÍ de acuerdo con la NOM-052-ECOL-1993 a los sedimentos del alcantarillado almacenados en 3 estaciones de transferencia de la C.D.M.X., la prueba CRETÍ determina si un residuo es peligroso en términos de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad o inflamabilidad. Con base en los resultados de dicho estudio, los sedimentos analizados no cumplieron con el límite máximo permisible para reactividad debido a las concentraciones de sulfuros liberables, que excedieron los 500 mg/kg. Las altas concentraciones de sulfuros liberables son atribuibles a la descomposición de sulfatos bajo condiciones anóxicas generalmente presentes en las alcantarillas (Schmitt y Seyfried, 1992). Con base en lo anterior, al realizar el muestreo se evitó someter a los sedimentos a condiciones ácidas para no generar gases tóxicos.

Los sedimentos se transportaron en recipientes rígidos, con tapa hermética de polipropileno y fueron debidamente etiquetados. Las anotaciones se llevaron a cabo durante el muestreo en una hoja de campo y se pegaron en los recipientes. Los sedimentos recolectados para las pruebas de toxicidad aguda y grasas y aceites fueron transportados en frascos de vidrio de boca ancha.

Los recipientes con las muestras de 8 kg de sedimentos fueron colocados en hieleras, los tiempos de transporte no excedieron las 4 horas ya que la normatividad establece un tiempo máximo de transporte de 6 horas.

Para la toma de muestras se usó el método del cuarteo establecido en la NOM-004-SEMARNAT-2002, el cual consistió en tomar una cantidad de sedimento mayor a 10 kg, éstos se trasladaron a un área plana horizontal de aproximadamente 4 m x 4 m de cemento pulido o similar y bajo techo, posteriormente, se depositaron en un montículo e inmediatamente se traspaleó el material con pala para obtener una mezcla homogénea. A continuación, se dividió en cuatro partes aproximadamente iguales y se eliminaron las partes opuestas. Se repitió esta operación hasta dejar 4 kg aproximadamente de sedimentos. La pila resultante se utilizó para realizar las pruebas laboratorio

Se evitaron los cambios físicos, químicos y biológicos, por lo que las muestras fueron preservadas como se observa en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Preservación de muestras según Normas Mexicanas

Parámetros	Preservación	Tiempo máximo de análisis	Fuente
Coliformes fecales	4°C	48 horas	NOM-004-SEMARNAT-2002
Cadmio, cromo y plomo	4°C	180 días	NOM-004-SEMARNAT-2002
DQO	4°C	28 días	NMX-AA-030/1-SCFI-2012
DBO	4°C	24 horas	NMX-AA-028-SCFI-2001
Fósforo reactivo	4°C	4 horas	NMX-AA-029/1-SCFI-2008
Grasas y aceites	4°C	28 días	NMX-AA-005-SCFI-2000
pH	4°C	6 horas	NMX-AA-008-SCFI-2011
Toxicidad aguda	4°C	12 días	NMX-AA-112-1994-SCFI
Granulometría	No requiere	No aplica	ASTM C136
Densidad	No requiere	No aplica	ASTM C128
Sólidos totales	4°C	24 horas	NOM-AA-34-1976
Contenido orgánico	4°C	24 horas	NOM-AA-34-1976

3.5.2. Pruebas de laboratorio

El análisis de los sedimentos es un procedimiento destinado a la estimación no sesgada de los indicadores ambientales propuestos para valoración cualitativa o cuantitativa de los impactos ambientales. Un paso esencial de todo análisis cualitativo y cuantitativo es la elección de las técnicas analíticas aplicables en la caracterización de sedimentos. Es una elección a veces difícil y que requiere experiencia al igual que intuición. Uno de los primeros factores que se considera en el proceso de elección es el grado de exactitud y precisión necesario, desafortunadamente la alta fiabilidad requiere invertir mucho tiempo y muchos recursos económicos. El método elegido suele ser un término medio entre la exactitud necesaria, por un lado, el tiempo y el dinero disponible para el análisis, por el otro (Skoog, 2005).

La Tabla 3.4 incluye las pruebas de laboratorio realizadas y los métodos usados. Es pertinente mencionar que para la determinación de DBO, DQO, fósforo reactivo y coliformes fecales las muestras de sedimentos fueron sometidas a un tratamiento de lixiviometría, mediante el método propuesto por Crabtree y Forster (1989), el cual consistió en homogenizar los sedimentos en un mortero de porcelana con un mazo de madera, posteriormente, para obtener los extractos se agregaron 10 g de muestra tratada a 190 ml de agua destilada. La mezcla se mantuvo en agitación durante 2 horas y finalmente fue filtrada.

Tabla 3.4. Pruebas de laboratorio y métodos aplicados

Parámetros	Método	Técnica analítica
Coliformes fecales	APHA 9222 B	Filtro de membrana
Cadmio, cromo y plomo	APHA 3111 B	Espectrometría de absorción atómica de flama
DBO	APHA 5210 B	Prueba de 5 días
DQO	APHA 5220 D	Reflujo cerrado
Fósforo reactivo	APHA 4500-P C	Colorimetría
Grasas y aceites	APHA 5520 D	Método de soxhlet
Toxicidad aguda	APHA 8050 B	Microtox
pH	APHA 4500-H+A	Papel indicador
Granulometría	ASTM D422	Tamizado
Densidad	ASTM C128	Método de picnómetro
Sólidos totales	ASTM C566-97	Evaporación
Contenido orgánico	ASTM D2974	Ignición

3.6. Evaluación de impactos ambientales

Se denomina evaluación de impacto ambiental al procedimiento para la valoración cualitativa o cuantitativa de los impactos ambientales de una acción determinada (César, 2007).

La valoración cuantitativa consistió en medir el aumento o disminución de la calidad ambiental como resultado de los impactos, empleando indicadores numéricos que tenían unidades diferentes (mg/l, unidades de toxicidad, mg/kg, etc.). Las unidades de los indicadores se convirtieron de heterogéneas a homogéneas mediante funciones de transformación, con el propósito de hacer comparaciones entre los distintos tipos de impactos y de obtener una valoración numérica del impacto total producido.

Para relacionar la evaluación objetiva de un factor ambiental con el juicio subjetivo de valor sobre su calidad se usaron funciones de transformación. Dichas funciones se basan en una escala de valores indicadores que abarcan desde una *alta calidad* hasta una *baja calidad*; y se trata de una escala de proporciones.

Funciones de transformación

Las funciones de transformación consisten en relaciones de la magnitud de cada indicador, medida en las unidades propias de cada uno de ellos, y su calidad ambiental expresada en unidades comparables. El valor que el indicador de un determinado parámetro, por ejemplo, materia orgánica, sustancias tóxicas, etc., tiene en una situación determinada, o se prevé que resultará de una actuación, es muy variable, y a cada valor le corresponde un cierto grado de calidad. Esta calidad está acotada entre un valor pésimo y uno óptimo. Para obtener valores de calidad comparables, al extremo óptimo se le asigna una calidad ambiental de 1 y al pésimo el 0, quedando comprendidos entre ambos extremos los valores intermedios para definir estados de calidad del parámetro (César, 2007).

Para obtener de manera adecuada las funciones de transformación se procede de la siguiente forma:

- a) Se busca la mayor información sobre el factor ambiental que se estudia, tanto científica, como normativa. De este estudio se obtiene el mayor valor posible (Máx) del indicador del factor, que puede ser 1 y el menor valor posible (Mín) del indicador del factor, que puede ser 0.
- b) En el eje de abscisas se sitúan los valores Máx y Mín y se marca una escala.
- c) En el eje de ordenadas se sitúa el 0 y el 1, marcando también una escala (Figura 3.6).
- d) Ahora caben las siguientes posibilidades: que la función sea creciente, con lo que la función debe pasar por los puntos (Mín, 0) y (Máx, 1), que la función sea decreciente y deba pasar por (Máx, 0) y (Mín, 1), o que alcance un máximo o un mínimo en un valor, a , intermedio y se marcan estos puntos.
- e) Para conocer la forma de la función de transformación: recta, parábola, logarítmica, exponencial, potencial, etc. se puede hacer mediante una consulta a un panel de expertos, que indicarán la relación entre los valores intermedios del indicador o del índice, o seleccionar, con el conocimiento adquirido sobre el factor, una de las funciones de transformación.
- f) La función de transformación puede tener muchas formas. De algunas de ellas se determina a continuación la fórmula, pero no son las únicas por lo que en ocasiones, habrá que determinar otras nuevas, y en otros casos, será conveniente hacer modificaciones a las expresiones propuestas, que son:
 - I. Una recta, si ambas magnitudes son proporcionales.
 - II. Una parábola que varía rápidamente para valores bajos de la magnitud, y lentamente para valores altos.
 - III. Una parábola que varía lentamente para valores bajos de la magnitud y rápidamente para valores altos.
 - IV. El impacto varía rápidamente en los extremos y lentamente en el centro.
 - V. El impacto varía lentamente en los extremos y rápidamente en el centro.
 - VI. El crecimiento del impacto no es continuo y la función de transformación es una función en escalera, con saltos para determinados valores.
 - VII. Existe un umbral a partir del cual el impacto no es aceptable.
 - VIII. No hay relación entre el impacto y el indicador y se considera el impacto constante.
 - IX. La función de transformación no es siempre creciente ni siempre decreciente, sino que alcanza para un valor intermedio del indicador un máximo o un mínimo.
- g) En el caso de desear una mayor fiabilidad en la función elegida se puede realizar un nuevo proceso de consultas a nuevos expertos.

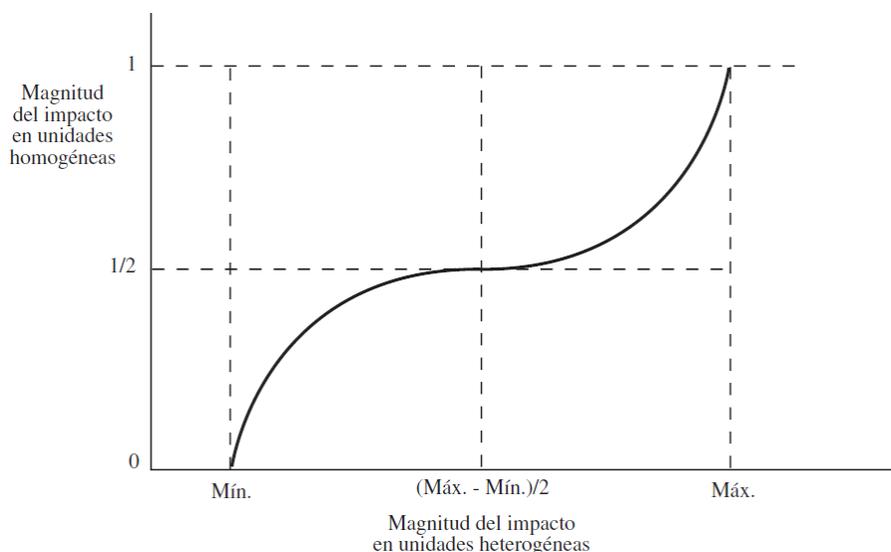


Figura 3.6. Función de transformación creciente, formada con dos parábolas, que crece rápidamente para valores del indicador pequeños y grandes, y lentamente para valores intermedios

Fuente: Garmendia *et al.*, 2005

3.7. Propuesta de medidas de mitigación

El objetivo de evaluar el impacto ambiental del manejo de sedimentos extraídos de redes de alcantarillado es prevenir y corregir los efectos negativos que las acciones tienen en el ambiente, para lo que se estudian las medidas preventivas, protectoras, correctoras y compensatorias con el fin de eliminar, atenuar, evitar, reducir, corregir o compensar los efectos negativos que las acciones producen sobre el ambiente, así como aumentar, mejorar y potenciar los efectos positivos (Garmendia *et al.*, 2005).

Las medidas que se adoptaron para minimizar los impactos ambientales producidos por el manejo de los sedimentos extraídos del alcantarillado urbano pueden considerarse como la parte más importante, o al menos una de las más importantes del estudio de impacto ambiental. El impacto sobre el ambiente producido por estas actividades depende mucho de la forma en que se realicen, por lo que, se detallaron todas aquellas medidas necesarias para que sea el menor impacto posible.

Algunas medidas están relacionadas entre sí, y fue adecuado reflejar estas relaciones, ya que es posible que exista entre ellas una sinergia positiva, es decir, que el efecto positivo que produzcan sea mayor que la suma de los efectos individuales.

Suelen considerarse tres tipos de medidas según la forma de actuar: las medidas preventivas o protectoras, las medidas correctoras y las medidas compensatorias.

Se denominan medidas protectoras o medidas preventivas aquéllas que evitan la aparición de un efecto ambiental negativo.

Las medidas correctoras modifican las acciones o los efectos, por lo que anulan, corrigen, atenúan un impacto recuperable. Una medida correctora supone la intervención, una vez producido el impacto, como por ejemplo el tratamiento de los sedimentos y su reúso.

Son medidas compensatorias las que ni evitan, ni atenúan, ni anulan la aparición de un efecto negativo, pero contrarrestan la alteración del factor al realizar acciones con efectos positivos que compensan los impactos negativos que son imposibles de corregir y disminuyen el impacto final de la acción (Garmendia *et al.*, 2005).

En la presente tesis se propusieron medidas preventivas y medidas correctoras.

Capítulo IV. Impacto ambiental del manejo de los sedimentos extraídos de redes de alcantarillado urbano de la Ciudad de México

En este capítulo se determina el impacto ambiental causado por la extracción, almacenamiento, transporte y disposición de los sedimentos de la red de colectores de agua residual de la Ciudad de México. El contenido corresponde a la secuencia metodológica expuesta en el Capítulo III, por lo que incluye las primeras dos etapas de la metodología: 1) Identificación de impactos y 2) Valoración de impactos.

La primera etapa, a su vez, incluye las siguientes fases: 1) Descripción del manejo de sedimentos extraídos de redes de alcantarillado urbano; 2) Descripción del sistema ambiental e 3) Identificación de los efectos ambientales que causa el manejo de sedimentos.

Con respecto a la segunda etapa, considera las fases siguientes: 1) Selección de indicadores ambientales, 2) Descripción de los procedimientos utilizados en el muestreo y los resultados de las pruebas de laboratorio y, por último, 3) Evaluación de impactos ambientales.

4.1. Descripción del manejo de los sedimentos extraídos de redes de alcantarillado urbano

Se entiende por manejo de sedimentos al conjunto de operaciones que incluyen la extracción, el transporte, almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento y disposición final. Este subcapítulo se refiere a las acciones del manejo de sedimentos en la Ciudad de México, susceptibles de provocar impactos ambientales. Las acciones son las actuaciones que se van a realizar en una obra, en este caso de mantenimiento. Entre las acciones sólo interesan las que pueden causar un efecto ambiental tanto adverso como benéfico. Con base en las observaciones de campo se establecieron las siguientes acciones:

- 1.- Extracción de sedimentos de la alcantarilla.
- 2.- Almacenamiento temporal de sedimentos extraídos
- 3.- Transporte de sedimentos
- 4.- Desechación de sedimentos
- 5.- Disposición final de sedimentos

La Figura 4.1 muestra el diagrama de las actividades realizadas durante el manejo de los sedimentos, cuando son extraídos por actividades de mantenimiento.

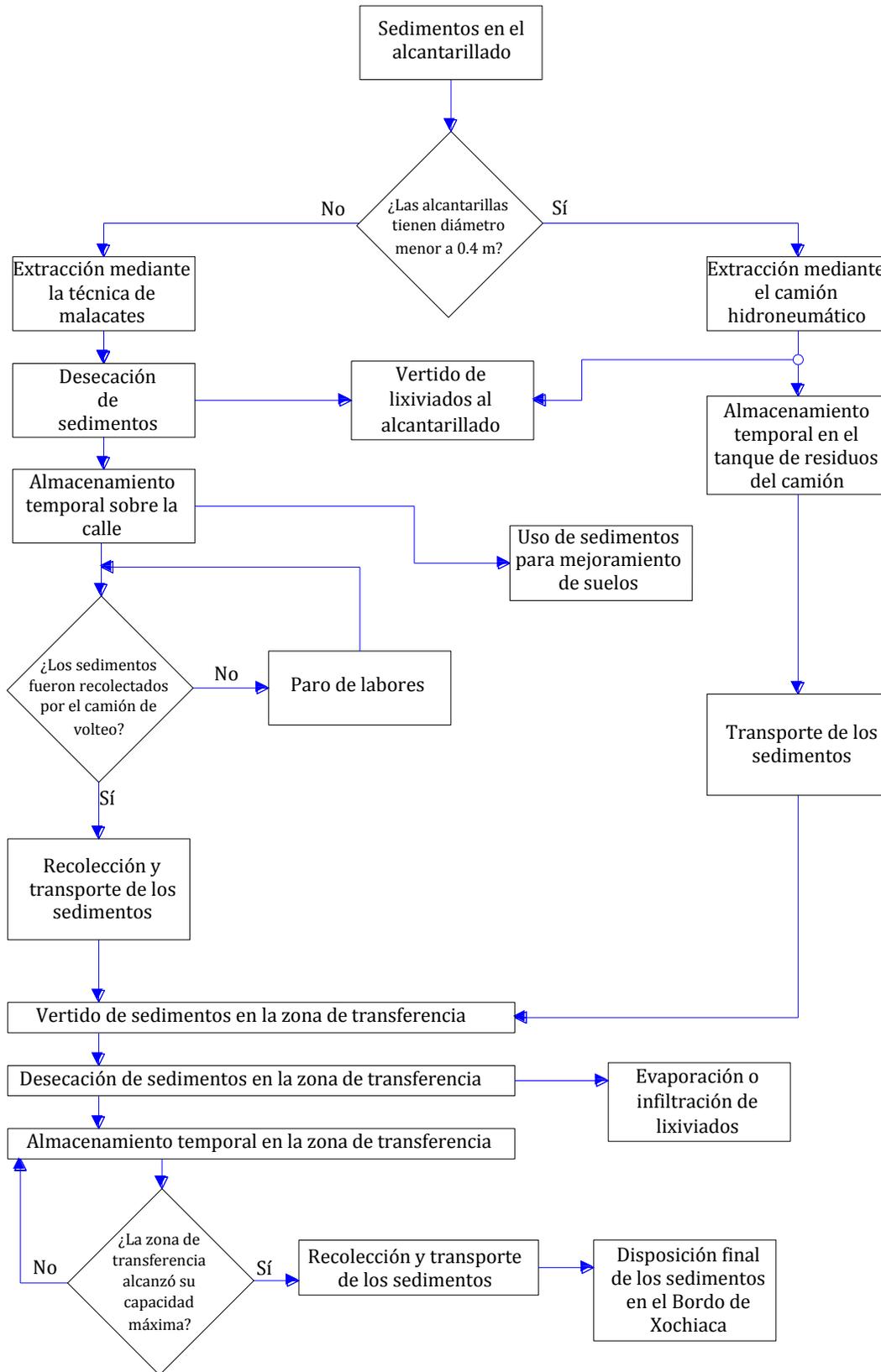


Figura 4.1. Diagrama de las actividades durante el manejo sedimentos en la Ciudad de México

A continuación se describen las acciones del manejo de sedimentos, susceptibles de provocar impactos ambientales.

4.1.1. Extracción de sedimentos de la alcantarilla

Extracción mediante camiones hidroneumáticos

El camión hidroneumático se estaciona frente a la alcantarilla obstruida, posteriormente los operadores destapan el pozo de visita y succionan el azolve que se encuentra en su interior. La siguiente maniobra es insertar la manguera de presión para destapar la alcantarilla, esta manguera entra a la tubería por medio de presión hidráulica. Una vez destapada la alcantarilla, se extrae la manguera de presión y los sedimentos son aspirados con la pluma de succión (Figura 4.2).



Figura 4.2. Extracción de sedimentos mediante camiones hidroneumáticos

Extracción mediante equipos de malacates

Los equipos se guardan por la noche en los campamentos provisionales (Figura 4.3a); y por la mañana los operadores los llevan hasta la alcantarilla a desazolvar. Se coloca un equipo en los pozos de visita localizados en cada extremo del tramo de alcantarilla a desazolvar, posteriormente se sujeta la draga en el malacate y se inserta en la alcantarilla (Figura 4.3b); el equipo de malacate ubicado en el pozo de visita del otro extremo jala la draga 2 metros, a continuación se destensan los malacates y la draga cae, el malacate contrario jala la draga y ésta arrastra los sedimentos hasta que se llena la draga.

El desazolvar se realiza dentro de las alcantarillas por secciones de dos a cinco metros para que al arrastrar la draga dentro de la tubería los sedimentos no la tapen.

Posteriormente, los sedimentos de la draga se depositan en una carretilla (Figura 4.3c) y se transportan a la orilla de la calle formando un montículo (Figura 4.3d), cada

brigada extrae 5 m³ diarios de sedimentos húmedos en una jornada de 8 horas con un horario de 7 a.m. - 3 p.m. y se trabaja de lunes a viernes.

Después de la jornada laboral, los trabajadores guardan los equipos de malacates en el campamento provisional, donde son vigilados por un velador.

Para el desazolve de colectores, el sobrestante se encarga de solicitar los planos de la red y un camión hidroneumático con el objetivo de preparar la alcantarilla a desazolvar. En la preparación de la alcantarilla, se sujeta un cable de acero a la manguera de presión del camión hidroneumático y es insertada a la alcantarilla junto con el cable de acero de ¼" de diámetro, posteriormente, a este cable de acero se sujeta otro cable de ½" de diámetro y se jala con la ayuda de un malacate. Después de esta preparación, se realiza el desazolve y al finalizar la jornada laboral el cable de acero se deja insertado para que al día siguiente sólo se coloquen los malacates y la draga y se empiece a trabajar nuevamente.



Figura 4.3. Desazolve con equipos de malacates

4.1.2. Almacenamiento temporal de sedimentos extraídos

Los sedimentos extraídos de la alcantarilla se almacenan temporalmente en el tanque de residuos del camión hidroneumático, hasta que los operadores terminan su jornada laboral o tan pronto como el tanque se llene. Es práctica común no almacenar los sedimentos por más de una semana. Cuando el camión regresa al campamento de la jefatura de la zona que le corresponde, vierte los lixiviados de los sedimentos al alcantarillado para así contar con espacio en el tanque de almacenamiento de residuos, evitando con ello el ir a descargar los sedimentos a la zona de transferencia.

En contraste, los sedimentos extraídos con los equipos de malacates, se vierten en una carretilla, y se les lleva hacia la orilla de la avenida, los sedimentos se acumulan cerca de una coladera de banqueta para que los lixiviados ingresen al alcantarillado y no provoquen encharcamientos. Por lo general, en una semana los operadores son capaces de extraer hasta 30 m³ de sedimentos.

El montículo formado por los sedimentos es cargado a un camión de volteo al finalizar la jornada laboral o en caso contrario, queda abandonado por varios días sin señalamientos o barreras de protección, ocasionando molestias a los vecinos y transeúntes, además, puede provocar accidentes ya que durante la noche el montículo no es visible para los automovilistas. Es pertinente mencionar que si el camión de volteo que habrá de transportar los sedimentos no acude al sitio, los operadores dejan de extraer sedimentos, ya que debido al tiempo de almacenamiento empiezan a producirse malos olores y molestias a los vecinos.

4.1.3. Transporte de sedimentos

La acción denominada transporte de sedimentos incluye el traslado del material de los sitios de la red de alcantarillado de donde se extrajo, a la zona de transferencia y el traslado desde dicho lugar al sitio de disposición final. Los sedimentos son trasladados a la zona de transferencia mediante los camiones hidroneumáticos. En el caso de los sedimentos extraídos con malacates, amontonados en la orilla de la avenida, ya deshidratados se cargan a un camión de volteo y son trasladados a la zona de transferencia descrita posteriormente.

Los sedimentos son cargados mediante un equipo mecánico especial (Figura 4.4) y son depositados en la caja del camión de volteo. Las distancias de traslado son variables, dependen de la localización de la brigada y de la ruta elegida por el conductor para recolectar los sedimentos de las 9 brigadas. Con base en las observaciones efectuadas en campo, se estima que el camión recolector pasa una vez a la semana, por lo que los operadores de los equipos de desazolve suelen trabajar solo un día a la semana para no ocasionar molestias a los vecinos.

Una vez alcanzada la capacidad máxima de almacenamiento de sedimentos en la zona de transferencia, son trasladados en camiones de volteo al relleno sanitario Bordo de Xochiaca, para ser usados como material de cubierta. Este traslado es de 15 km aproximadamente.



Figura 4.4. Equipo de recolección de sedimentos

4.1.4. Desección de sedimentos

Los sedimentos contenidos en los camiones hidroneumáticos son descargados en la zona de transferencia y se mantienen durante dos días en el sección de tiro. Una vez que los sedimentos se desaguan, se emplea un cargador frontal sobre neumáticos para moverlos a la sección de almacenamiento, donde permanecen hasta alcanzar la capacidad máxima del área (Figura 4.4).

El sitio de tiro, denominado *zona de transferencia*, se localiza en la Avenida Eje 5 Sur, casi esquina con Avenida Eje 7 Oriente, Colonia Ejército de Agua Prieta, Delegación Iztapalapa, Ciudad de México (Figura 4.5).

La zona de transferencia se encuentra en el borde del vaso de la laguna de regulación de la estación de bombeo del drenaje profundo número 5. La superficie de la zona es de 21,200 m², que representa el 10% de la superficie total de la laguna de regulación.

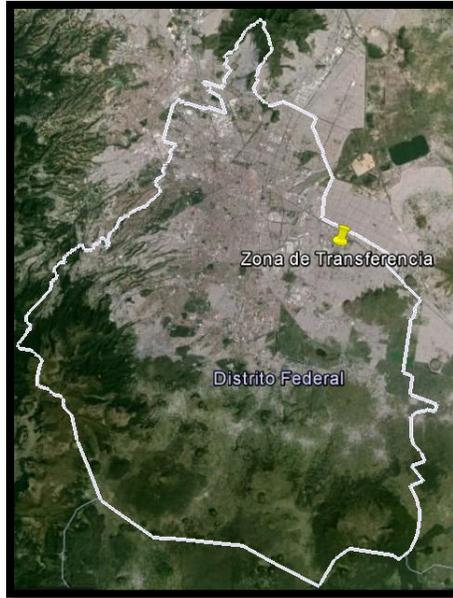


Figura 4.5. Ubicación de la zona de transferencia de sedimentos

Fuente: Obtenida de Google Earth, 2016

En dicha zona se reciben de 15 a 20 vehículos diarios, ya sea camiones hidroneumáticos o de volteo. Considerando que los camiones tienen una capacidad de 7 m^3 , el volumen máximo diario de sedimentos es de 140 m^3 .

Como se muestra en la Figura 4.6, la zona de transferencia se divide en cuatro secciones funcionales: de maniobras, de tiro, de secado y de almacenamiento.



Figura 4.6. Distribución de secciones en la zona de transferencia

Fuente: Obtenida de Google Earth, 2016

La sección de maniobras es rectangular, de 20 m de ancho por 30 m de largo. La superficie de 600 m² tiene piso de concreto y es utilizada por los camiones para posicionarse y descargar los sedimentos sin problemas de atascamiento (Figura 4.7a).

La sección de tiro cuenta con dos rampas de concreto cuya pendiente permite el desaguado de los sedimentos, al final de las rampas se dispuso una compuerta para que los lixiviados viertan al área de secado. La superficie de esta área es de 600 m². Desde el punto de vista del impacto en el medio social del manejo de sedimentos, es pertinente mencionar que se observó a algunas personas buscando objetos de valor entre los sedimentos (Figura 4.7b).

Los sedimentos extraídos de las alcantarillas contienen alto porcentaje de humedad (>30%), en la sección de secado los lixiviados se evaporan o se infiltran al subsuelo. Se observó vegetación escasa y gran cantidad de fauna nociva, como aves y perros (Figura 4.7c), la superficie de esta sección es de 1 hectárea.

La sección de almacenamiento tiene la finalidad de acumular los sedimentos secos provenientes del área de tiro (Figura 4.7d). Los sedimentos son removidos mediante dos cargadores frontales sobre neumáticos. Tiene una superficie aproximada de 1 hectárea y una capacidad de 32,000 m³. Cabe indicar que la capacidad máxima de almacenamiento podría ser mayor a 320,000 m³, ya que la superficie del vaso de la laguna de regulación podría ser usada como área de almacenamiento.



Figura 4.7. Secciones de la zona de transferencia

Nota: En las fotos a y c se observan pepenadores buscando entre los sedimentos.

La laguna de regulación está rodeada de zonas habitacionales de clase socioeconómica media baja. Existe una fuerte presión del movimiento “Antorcha campesina” para ocupar el terreno del vaso de la laguna como asentamiento humano ilegal, ya que no cuenta con protección perimetral; para contrarrestar la inseguridad en el sitio, es resguardada por sólo dos personas durante todo el día.

4.1.5. Disposición final de sedimentos

Cuando la zona de transferencia alcanza su capacidad máxima se realiza una licitación pública para que una empresa transporte los sedimentos al relleno sanitario Bordo de Xochiaca, donde son empleados como material de cubierta.

La Tabla 4.1 muestra el cuadro de acciones realizadas durante el manejo de sedimentos, susceptibles de causar impactos ambientales.

Tabla 4.1. Acciones del manejo de los sedimentos extraídos del alcantarillado de la CDMX

Acciones
Extracción de sedimentos de la alcantarilla
Almacenamiento temporal de sedimentos extraídos
Transporte de sedimentos
Desecación de sedimentos
Disposición final de sedimentos

4.2. Descripción del sistema ambiental

Las fuentes de información para el desarrollo del inventario ambiental son entrevistas efectuadas a funcionarios del SACMEX, encargados de jefaturas, operadores de los equipos y encargados de la zona de tiro; información solicitada al Laboratorio Central de Control de Calidad del Agua del SACMEX, revisión bibliográfica, así como recorridos en camiones hidroneumáticos.

Una vez analizada la información obtenida, se elaboró la lista de factores ambientales afectados por el manejo de sedimentos. Los factores ambientales seleccionados tienen las siguientes características: son medibles, independientes, fácilmente identificables y además pueden ser modificados significativamente por las acciones del manejo de sedimentos. Los factores o parámetros ambientales se organizaron en distintos niveles, que al esquematizarlos, dan lugar a una estructura de tipo árbol (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Árbol de factores del sistema ambiental susceptibles de ser afectados

Medio	Elemento	Factor
A. Físico	A.1. Tierra - suelo	A.1.1. Contaminación del suelo
	A.2. Agua	A.2.1. Calidad de aguas residuales
	A.3. Aire	A.3.1. Calidad del aire A.3.2. Nivel de ruido
B. Perceptual	B.1. Paisaje	B.1.1. Calidad del paisaje
		B.1.2. Olores
C. Socio-económico	C.1. Población	C.1.1. Obstrucción de vialidades
		C.1.2. Salud y seguridad
		C.1.3. Prevención de inundaciones

Con la información recopilada y su posterior análisis, se elaboraron fichas técnicas que describen el escenario ambiental de la zona de estudio. Dichas fichas se presentan en el apartado de anexos.

4.3. Identificación de efectos ambientales

En este apartado se identifican las relaciones causa – efecto entre las acciones del manejo de sedimentos y los factores ambientales relevantes. Para identificar los impactos se parte del conocimiento de la actuación (Apartado 4.1) y de la descripción del sistema ambiental (Apartado 4.2).

La mejor herramienta para identificar impactos ambientales son las matrices de relaciones causa-efecto. Cada factor ambiental corresponde a una fila y cada acción a una columna, que se relacionan mediante una matriz que permite señalar las posibles interacciones (Tabla 4.3).

En las casillas de la matriz se indica con un signo o clave si se causa un impacto benéfico (+) o adverso (-). El Efecto benéfico es aquél admitido como tal, tanto por la comunidad técnica y científica como por la población en general, en el contexto de un análisis completo de los costos y beneficios genéricos y de las externalidades de la actuación considerada. El efecto adverso es aquél que se traduce en pérdida de valor paisajístico, de productividad ecológica o económica, o en aumento de los perjuicios derivados de la contaminación y demás riesgos ambientales.

Tabla 4.3. Matriz de identificación de impactos ambientales

Elemento	Factor	Acción				
		Extracción de sedimentos de la alcantarilla	Almacenamiento temporal de sedimentos extraídos	Transporte de sedimentos	Desecación de sedimentos	Disposición final de sedimentos
A.1. Suelo	A.1.1. Contaminación del suelo	-	-	-	-	-
A.2. Agua	A.2.1. Calidad de aguas residuales	-	-	-	-	-
A.3. Aire	A.3.1. Calidad del aire	-	-	-	-	-
	A.3.2. Nivel de ruido	-	-	-	-	-
B.1. Paisaje	B.1.1. Calidad del paisaje	-	-	-	-	-
	B.1.2. Olores	-	-	-	-	-
C.1. Población	C.1.1. Obstrucción de vialidades	-	-	-	-	-
	C.1.2. Salud y seguridad	-	-	-	-	-
	C.1.3. Prevención de inundaciones	+	+	+	+	+

La Tabla 4.4 muestra la valoración cualitativa de los efectos ambientales. Los atributos que se toman en cuenta son: extensión (Ex), acumulación (A), persistencia (Pr), intensidad (In), recuperabilidad (Rc) y reversibilidad (Rv), los valores de los atributos corresponden a los establecidos en la Tabla 3.1.

Tabla 4.4. Matriz de caracterización de impactos ambientales

Elemento	Factor	Ex	A	P	In	Rc	Rv	Importancia	Valor normalizado
A.1. Suelo	A.1.1. Contaminación del suelo	-1	-3	-3	-8	-1	-1	-17	1.00
A.2. Agua	A.2.1. Calidad de aguas residuales	-3	-1	-3	-4	-1	-1	-13	0.64
A.3. Aire	A.3.1. Calidad del aire	-3	-1	-1	-4	-1	-1	-11	0.45
	A.3.2. Nivel de ruido	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-6	0.00
B.1. Paisaje	B.1.1. Calidad del paisaje	-1	-1	-1	-4	-1	-1	-9	0.27
	B.1.2. Olores	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-6	0.00
C.1. Población	C.1.1. Obstrucción de vialidades	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-6	0.00
	C.1.2. Salud y seguridad	-1	-1	-3	-4	-1	-1	-11	0.45
	C.1.3. Prevención de inundaciones	+3	+1	+1	+8	+1	+1	+15	0.82

En la Tabla 4.4, el valor de la importancia es la suma de los valores de los atributos y los valores normalizados se calcularon con la ecuación 4.0

$$\text{Valor normalizado} = \frac{|\text{Importancia}| - \text{Valor mínimo}}{\text{Valor Máximo} - \text{Valor mínimo}}$$

Ecuación 4.0

4.3.1. Cribado de impactos ambientales

En una primera aproximación se han identificado los efectos ambientales producidos por las acciones del manejo de sedimentos sobre los factores ambientales, mediante la matriz de la Tabla 4.4. Muchos de estos efectos son mínimos y es posible ya no considerarlos en adelante en la evaluación, una vez que se ha estimado si son efectos benéficos o adversos. Tal es el caso de los siguientes factores ambientales: calidad de los olores, nivel de ruidos y obstrucción de vialidades, los cuales son afectados moderadamente por algunas acciones, por tal motivo ya no son considerados en adelante.

Es conveniente cribar y seleccionar los factores ambientales significativos para la evaluación de impactos ambientales, dado que el proceso es tardado y muchas veces costoso por la gran cantidad de indicadores ambientales.

4.4. Selección de indicadores ambientales

Se denomina *indicadores de impacto ambiental* a los parámetros que proporcionan la medida de la magnitud del impacto, en la medida de lo posible de manera cuantitativa. La selección de indicadores de impacto es un aspecto fundamental de la evaluación. Los indicadores de impacto más sencillos de utilizar y más concretos son los establecidos en las normas o estándares de calidad de los diferentes elementos ambientales (Estevan, 1977).

En el subcapítulo 4.3 se estimó que los impactos críticos causados por el manejo de sedimentos se producen en el suelo y en el agua residual; en el primer caso, los lixiviados se infiltran en el suelo y, en el segundo caso, los lixiviados son vertidos al alcantarillado aumentando la concentración de contaminantes en el agua residual.

En virtud de lo anterior, los indicadores ambientales seleccionados se concentran en la caracterización de los sedimentos extraídos del alcantarillado.

Los indicadores ambientales seleccionados en la presente investigación son los siguientes:

- pH
- DQO
- DBO
- Fósforo reactivo
- Plomo, cromo y cadmio
- Grasas y aceites
- Sólidos totales
- Contenido orgánico
- Densidad
- Granulometría
- Coliformes fecales
- Alteración del paisaje
- Toxicidad aguda

Los indicadores ambientales anteriores permitieron el entendimiento de las afectaciones ocasionadas al ambiente por el manejo de sedimentos de las alcantarillas.

Para todos los indicadores utilizados, fue necesaria una descripción detallada de su comportamiento, dejando claro los supuestos teóricos que se están asumiendo y las posibilidades de error o de incertidumbre que se pueden producir, por lo que a continuación se presenta la justificación de la selección de los indicadores.

Justificación de la selección de los indicadores ambientales

Para determinar la corrosividad de los sedimentos se midió su pH. Se realizó la medición de pH con ayuda de papel indicador ya que este método es aplicable en el campo y a lodos acuosos.

Para que los sedimentos de las alcantarillas puedan ser aprovechados, deben cumplir con los límites máximos permisibles de metales pesados establecidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002 (ver Tabla 1.1), por lo anterior, se realizaron pruebas para determinar la concentración de plomo, cadmio y cromo en los sedimentos. Con base en el anexo VI de la NOM-004-SEMARNAT-2002 en el cual se establecen las técnicas para la cuantificación de metales pesados, se usó la técnica analítica espectrometría de absorción atómica de flama.

La NOM-004-SEMARNAT-2002 establece los límites máximos de indicadores bacteriológicos de contaminación para que éstos puedan ser clasificados como lodos estabilizados, por lo que se realizó la prueba de coliformes fecales. No se consideró pertinente realizar las pruebas de Salmonella spp. y huevos de helmintos, ya que para evaluar el impacto ambiental a la salud sólo es necesario un indicador ambiental. La determinación de coliformes fecales se realizó con la técnica de placa con diferentes diluciones.

Aunado a lo anterior, se realizó la prueba de toxicidad aguda para indicar la posible afectación a la salud de las personas, con esta prueba se pudo determinar el grado de toxicidad (expresado en unidades de toxicidad) de los sedimentos. La prueba se llevó a cabo con el método de Microtox, éste usa la bacteria la *Photobacterium phosphoreum* y mide la concentración media efectiva (expresada en %) que afecta o mata al 50 % de la población microbiana.

Por otra parte, con el objetivo de determinar la alteración de la concentración de contaminantes en el agua residual debido al ingreso de lixiviados al alcantarillado se realizaron las pruebas de grasas y aceites, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, y fósforo reactivo.

La medición de grasas y aceites incluye ácidos grasos, jabones, grasas, ceras, hidrocarburos, aceites y cualquier otra sustancia susceptible de ser extraída con hexano. El método usado para determinar las grasas y aceites fue el método de extracción Soxhlet.

La demanda química de oxígeno es la medida del equivalente en oxígeno del contenido de materia orgánica de una muestra que es susceptible de oxidación por un oxidante químico fuerte (APHA, 2005). El método de digestión de reactor fue el que se aplicó para determinar la DQO siguiendo el procedimiento 5220 D de la APHA.

Esencialmente, la DBO es una medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable bajo condiciones aerobias en un período de 5 días y a 20 °C. Para la presente investigación, la DBO fue determinada con el procedimiento APHA 5210 B.

De acuerdo con Hansen (2015), las elevadas concentraciones de nutrientes como fósforo en cuerpos de agua generan condiciones de eutrofización y traen como consecuencia diversos problemas para la salud ecológica y humana, por ejemplo, el crecimiento excesivo de biomasa de macroalgas, pérdida de la diversidad de fauna, cambios de color, olor, turbiedad, por mencionar algunos. El fósforo reactivo disponible en los cuerpos lóticos (ríos), evidencia el aporte antrópico proveniente de actividades agrícolas (fertilizantes, herbicidas, pesticidas), ganaderas (estiércol), industriales y urbanas (aguas residuales, vertidos). Con base en lo anterior, en este trabajo se determinó el fósforo reactivo con el método de colorimetría.

Además de las características anteriores, se realizaron pruebas de densidad, granulometría, y sólidos, debido a que éstas tres variables influyen en los efectos hidráulicos de los sistemas de alcantarillado (ver sección 2.4.2) y en el transporte de los sedimentos (ver sección 2.5.2).

La granulometría es medición y gradación de los granos de una formación sedimentaria. Para determinarla se usó el método de tamizado, éste es un proceso mecánico mediante el cual se separan las partículas en sus diferentes tamaños utilizando tamices en orden decreciente.

En la mayoría de los métodos estándar para pruebas de densidad se señala la remoción de la materia orgánica para realizar la prueba, de tal manera que, la densidad de las partículas refleje solamente la fase mineral. Con base en lo anterior, la densidad se determinó con el método del picnómetro (ASTM C128). Finalmente, para determinar los sólidos totales se usó el método de evaporación y para determinar el contenido orgánico se usó el método de ignición.

4.5. Muestreo y resultados de las pruebas de laboratorio

A continuación se hace mención de los resultados de las pruebas de laboratorio que se realizaron en los sedimentos de estudio. Los parámetros se clasificaron en: químicos-biológicos y físicos. Los primeros incluyen a los metales pesados, la DBO, DQO, fósforo reactivo, pH, grasas y aceites, contenido orgánico, coliformes fecales y toxicidad aguda. Los segundos incluyen a los sólidos totales, densidad y granulometría.

Resultados químicos-biológicos

Existe una gran diferencia visual entre los dos estratos, los sedimentos de tipo A, son viscosos y pegajosos, mientras que los sedimentos de tipo B, son granulares y compactos. Se intuye que la diferencia visual es producida por el contenido de papel higiénico en los sedimentos de tipo A.

La Tabla 4.5 resume las características químico-biológicas de los sedimentos extraídos de las alcantarillas. Se observa variabilidad alta en los resultados, ya que las características químicas de los sedimentos están relacionadas con la calidad del agua residual que fluye en la alcantarilla, dicha calidad está en función del uso de suelo del área drenada.

Tabla 4.5. Características químicas de los sedimentos de una alcantarilla

Muestra	Estrato	DQO (mg/kg)	DBO (mg/kg)	Fósforo Reactivo (mg/kg)	Contenido Orgánico (%)	*Grasas y aceites (g/kg)
Muestra "Ciudad de Acapulco"	Estrato A	204	112	0.32	0.87	3.95
	Estrato B	296	44	0.51	4.21	6.59
Muestra del camión hidroneumático	Única muestra	6644	960	215.2	6.82	6.52
Sitio 1	Estrato A	6692	360	12.8	4.14	7.33
	Estrato B	5328	600	8	3.23	2.62
Sitio 2	Estrato A	6204	480	13.6	16.50	7.47
	Estrato B	4704	360	12	11.38	6.92
Sitio 3	Estrato A	7316	680	112.8	17.35	8.24
	Estrato B	7404	680	2.4	29.31	5.04
Sitio 4	Estrato A	6484	1280	110.8	0.44	3.39
	Estrato B	6720	640	93.6	0.44	2.27
Sitio 5	Estrato A	944	280	78.4	0.56	3.18
	Estrato B	460	420	104	1.12	3.53
Sitio 6	Estrato A	1380	220	27.2	0.96	1.59
	Estrato B	1344	160	50.4	0.50	2.47
Sitio 7	Estrato A	820	140	5.6	3.45	3.86
	Estrato B	624	100	6	3.38	5.70
Sitio 8	Estrato A	5440	120	166.8	5.85	1.80
	Estrato B	1920	340	90.8	5.21	1.53
Sitio 9	Estrato A	7152	620	132	0.06	3.47
	Estrato B	6400	340	81.6	0.05	6.92

*Base seca

En los sedimentos de tipo A, los parámetros DQO, DBO, fósforo reactivo, grasas y aceites y contenido orgánico, en general, tienen mayor concentración que en el tipo B, esto confirma la existencia de dos estratos de sedimentos en la alcantarilla. La concentración baja de contaminantes en los sedimentos de tipo B se atribuye a la degradación de la materia orgánica debido al tiempo de permanencia en la alcantarilla.

Se puede destacar que la ciudad de Acapulco tuvo la menor concentración de DQO y DBO. Las muestras con mayor concentración de DQO fueron las del sitio 3, esto se debe a que este sitio está rodeado de talleres mecánicos y cocinas económicas. El punto con mayor concentración de DBO y contenido orgánico fue el sitio 4, localizado cerca de la Plaza Garibaldi y de un mercado, por lo que se considera que la concentración de DBO se debió a las descargas del mercado. El sitio 8 presentó mayor concentración de fósforo reactivo debido a los fertilizantes usados en los campos deportivos cercanos.

Los resultados del pH en los sedimentos, oscilan entre 6.5 y 7. En principio, se estimaría un pH ácido debido a la degradación de la materia orgánica en los sedimentos de tipo B pero al estar en contacto con el agua residual el pH se neutraliza., no obstante que existen casos de corrosión de tuberías del alcantarillado por presencia del ácido sulfhídrico (Boon, 1995), estos casos son particulares y su estudio no corresponde a los alcances de la presente investigación.

Una vez realizadas las pruebas bioquímicas se observó que los sitios 1, 2, 3, 4, 8, 9 presentaban mayores concentraciones de contaminantes y considerando los sitios que pudieran tener concentraciones de metales debido al uso de suelo en el que se ubicaban, se decidió realizar la determinación de metales pesados en los sitios 1, 2, 3 y 8. Aunado a lo anterior, en la NOM-004-SEMARNAT-2002 se establecen los límites máximos permisibles para 8 metales, de los cuales se determinó la concentración de plomo, cromo y cadmio, los otros cinco metales se discriminaron debido a que no se identificaron posibles fuentes durante el reconocimiento sanitario de cada sitio. En la Tabla 4.6 se muestran los resultados de los metales pesados de los cuatro sitios seleccionados.

Tabla 4.6. Concentraciones de metales pesados en sedimentos

Muestra	Estrato	*Pb (mg/kg)	*Cr (mg/kg)	*Cd (mg/kg)
Sitio 1	Estrato A	43.19	16.10	2.47
	Estrato B	59.28	19.75	1.39
Sitio 2	Estrato A	65.71	8.82	1.33
	Estrato B	58.63	7.37	0.96
Sitio 3	Estrato A	123.65	21.80	2.22
	Estrato B	129.10	27.89	2.48
Sitio 8	Estrato A	107.92	4.82	1.98
	Estrato B	125.04	4.86	1.75
LMP**	Excelente calidad	300	1200	39
	Buena calidad	840	3000	85

*Base seca

**Límite Máximo Permissible de la NOM-004-SEMARNAT-2002

Las concentraciones de plomo, cadmio y cromo fueron mayores en los sedimentos de tipo B porque estos elementos no son degradables. Es decir, la concentración de metales pesados en los sedimentos es inversamente proporcional al contenido de materia orgánica. Cabe mencionar que las concentraciones de metales no excedieron los límites máximos permisibles de la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Los resultados de la prueba de coliformes fecales y totales se muestran en la Tabla 4.7, estos resultados son el promedio aritmético de todos los 9 sitios muestreados y de los dos estratos recolectados.

Tabla 4.7. Concentraciones de coliformes fecales totales en sedimentos

	UFC coliformes fecales/gss*	UFC coliformes totales/gss*
Media	2,444,444	12,030,864
Máximo	4,000,000	20,370,370
Mínimo	1,481,481	6,388,889

*gramos de sedimento seco

El número de unidades formadoras de colonias de coliformes totales por gramo de sedimento seco es 100 veces mayor que la concentración promedio del agua residual municipal en América Latina (Hernández, 2016).

A continuación se muestran los resultados de toxicidad aguda que se determinó con ayuda del equipo Microtox (Tabla 4.8). Se decidió someter a la prueba de toxicidad sólo a las muestras del sitio 3 dado que fue el que presentó concentraciones elevadas de metales pesados y DQO en comparación con los otros 8 sitios.

Tabla 4.8. Resultados de toxicidad

Parámetro	Resultado	Unidades
Toxicidad Vibrio Fischeri 5 min.	26.5	EC50
Toxicidad Vibrio Fischeri 15 min.	38.44	EC50
Toxicidad Vibrio Fischeri 5 min.	3.773	UT
Toxicidad Vibrio Fischeri 15 min.	2.602	UT

UT: Unidades de toxicidad

EC50: Concentración efectiva media

Para interpretar los resultados anteriores se revisaron diversas fuentes bibliográficas, como resultado se encontró la Tabla 4.9.

Tabla 4.9. Escala de la clasificación de toxicidad con equipo Microtox y valores de UT

Unidades de toxicidad (UT)	Clasificación
>4	Muy tóxico
De 2 a 4	Tóxico
De 1.33 a 1.99	Moderadamente tóxico
< 1.33	Levemente tóxico

Fuente: Cruz, 2003

Con base en la Tabla 4.8 y la Tabla 4.9 se concluyó que los sedimentos son tóxicos, es decir, al entrar los sedimentos en contacto con un organismo produce daños estructurales o alteraciones bioquímicas o fisiológicas e incluso la muerte; dependiendo de la concentración y del tiempo de exposición.

Resultados de los parámetros físicos

En la Tabla 4.10 se puede observar que el sitio cinco presenta menor porcentaje de sólidos totales, esto se debe a su origen, ya que fue obtenida de un sifón invertido, en éste la velocidad aumenta impidiendo la sedimentación de sólidos.

Las densidades de los sedimentos variaron en un ámbito de 2246 a 2628 kg/m³ lo cual corresponde con el ámbito 2600 – 2900 kg/m³ de densidades de suelos (Juárez y Rico, 2005).

Tabla 4.10. Características físicas de los sedimentos de una alcantarilla

Muestra	Estrato	Sólidos totales (%)	Densidad (kg/m ³)
Muestra "ciudad de Acapulco"	Estrato A	91.6	2406
	Estrato B	93.6	2602
Muestra del camión hidroneumático	Única muestra	76	2431
Punto 1	Estrato A	54	2463
	Estrato B	52.8	2372
Punto 2	Estrato A	58	2247
	Estrato B	62	2341
Punto 3	Estrato A	41.2	2243
	Estrato B	49.2	2228
Punto 4	Estrato A	39.2	2185
	Estrato B	46.4	2384
Punto 5	Estrato A	91.6	2546
	Estrato B	91.2	2465
Punto 6	Estrato A	70.8	2629
	Estrato B	71.6	2428
Punto 7	Estrato A	83.2	2497
	Estrato B	80.8	2593
Punto 8	Estrato A	81.2	2542
	Estrato B	82.8	2463
Punto 9	Estrato A	68.4	2326
	Estrato B	76.8	2505

El análisis del tamaño de partícula de las muestras se llevó a cabo por tamizado del residuo mineral seco. Los sedimentos son un reflejo de los sólidos existentes en la cuenca de aportación y de las condiciones del flujo en la alcantarilla, por lo tanto, es de

esperar alta variabilidad entre las muestras de cada sitio, sin embargo, se prevé que en una sola alcantarilla se distinguirá entre un depósito de tipo A y un depósito de tipo B.

La Figura 4.9 muestra la distribución del tamaño de las partículas de sedimentos, se puede observar que no hubo una diferencia entre los dos tipos.

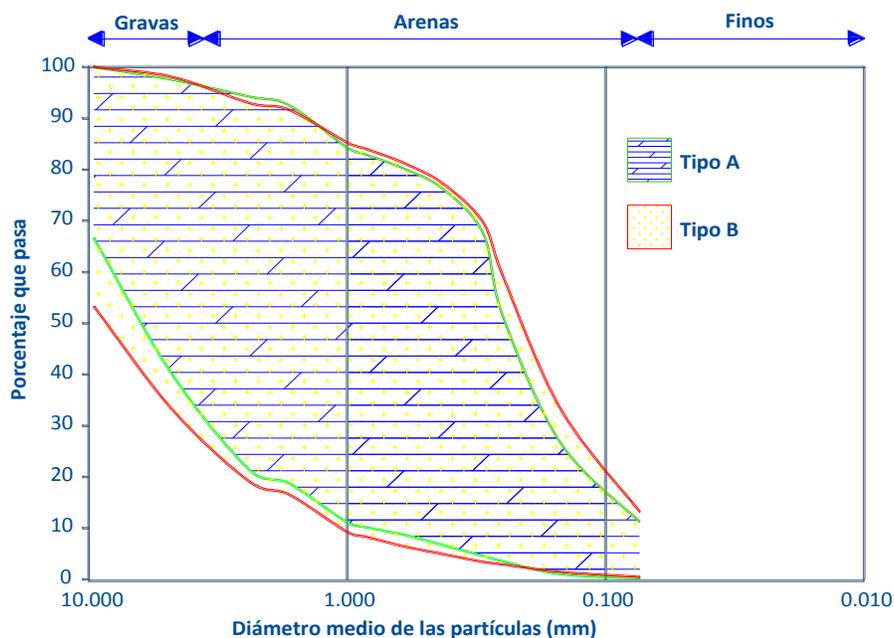


Figura 4.8. Curvas granulométría de los sedimentos

Con la determinación de la granulometría se obtuvieron los porcentajes de gravas, arenas y finos; los diámetros del 10, 30 y 60 por ciento de partículas (D_{10} , D_{30} , D_{60}). Estos resultados se expresan como porcentajes del peso en seco y se muestran en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11. Resultados del análisis granulométrico

Muestra	Estrato	D10 (mm)	D30 (mm)	D60 (mm)	C.U.*	C.C.**	% de gravas (50.0 mm - 2.38 mm)	% de arenas (2.38 mm - 0.074 mm)	% de finos (<0.074 mm)
Muestra "Ciudad de Acapulco"	A	0.27	0.75	1.98	7.20	1.03	19.11	80.44	0.44
	B	0.29	0.84	3.08	10.47	0.78	27.75	71.81	0.44
Muestras del camión hidroneumático	Única muestra	0.15	0.23	0.40	2.78	0.92	5.08	92.09	2.82
Sitio 1	A	0.14	0.23	0.54	3.81	0.72	5.47	89.84	4.69
	B	0.10	0.18	0.32	3.14	0.96	2.48	91.74	5.79
Sitio 2	A	0.13	0.25	0.73	5.52	0.64	8.09	88.24	3.68
	B	0.15	0.33	1.16	7.68	0.63	9.09	88.11	2.80
Sitio 3	A	0.15	0.22	0.34	2.24	0.95	4.88	92.68	2.44
	B	0.15	0.23	0.53	3.58	0.65	12.04	85.19	2.78
Sitio 4	A	0.12	0.20	0.28	2.37	1.26	1.92	92.31	5.77
	B	0.14	0.21	0.31	2.31	1.07	3.75	92.50	3.75
Sitio 5	A	0.58	1.34	3.15	5.40	0.97	22.57	76.77	0.66
	B	0.45	1.12	2.44	5.41	1.15	16.48	83.07	0.45
Sitio 6	A	0.15	0.21	0.25	1.69	1.18	7.47	90.80	1.72
	B	0.17	0.22	0.28	1.62	1.06	6.86	92.00	1.14
Sitio 7	A	1.09	4.33	9.52	8.74	1.81	66.83	32.68	0.49
	B	0.82	3.67	8.55	10.47	1.92	59.90	39.85	0.25
Sitio 8	A	0.28	0.67	3.10	11.16	0.51	27.98	70.98	1.04
	B	0.26	0.63	2.78	10.49	0.54	24.87	74.11	1.02
Sitio 9	A	0.04	0.14	0.42	10.41	1.19	4.64	82.12	13.25
	B	0.04	0.18	0.53	13.36	1.47	5.65	83.05	11.30

*Coeficiente de uniformidad

**Coeficiente de curvatura

Los sedimentos de tipo A y B presentan en promedio 80% de arenas y 3% de partículas finas, con base en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) los sedimentos pueden ser clasificados en: arenas mal graduadas. El porcentaje de gravas en los sedimentos fue relativamente bajo, 16%, esto era de esperarse ya que los sólidos de gran tamaño logran sedimentarse en los desarenadores de las coladeras pluviales. Los sedimentos del sitio 9 tuvieron un gran porcentaje de finos ya que la alcantarilla de donde fueron extraídos se encuentra rodeada de las áreas verdes pertenecientes al Reclusorio Norte de la Ciudad de México.

4.6. Evaluación de impactos ambientales

La redacción de este subcapítulo no sería posible sin los anteriores. El propósito es valorar cuantitativamente los componentes del cambio ambiental debido a las influencias interactuantes del hombre y la naturaleza.

Este apartado se divide en dos fases: la valoración de los elementos ambientales y la valoración de impactos ambientales; el objetivo de la primera fase es asignar un peso (importancia) a cada factor ambiental previamente establecidos en la sección 4.2. Posteriormente, en la fase dos, se valoran los impactos ambientales producidos por las actividades del manejo de los sedimentos establecidas en la sección 4.1.

4.6.1. Valoración de los elementos ambientales

Cada elemento ambiental es sólo una parte del ambiente, por lo que es importante disponer de un método que permita considerar todo el ambiente en su conjunto tomando en cuenta que cada elemento se estima que es más o menos importante (Garmendia *et al.*, 2005). Para ello se asignó a cada elemento una ponderación, distribuyendo la cantidad de 1000 unidades de importancia (UI) que representa la importancia total del medio ambiente entre todos los elementos.

La metodología aplicada a la presente investigación fue el Método Delphi, el cual consiste en consultar a expertos en el tema que se analiza para realizar la ponderación según su criterio. La Tabla 4.12 muestra la distribución de 1,000 Unidades de Importancia (UI) entre los factores ambientales.

Tabla 4.12. Ponderación de factores ambientales

Medio	Elemento	Factor	Ponderación (UI)
A. Físico (500 UI)	A.1. Suelo (200 UI)	A.1.1. Contaminación del suelo	200
	A.2. Agua (100 UI)	A.2.1. Calidad de aguas residuales	100
	A.3. Aire (200 UI)	A.3.1. Calidad del aire	200
B. Perceptual (100 UI)	B.1. Paisaje (100 UI)	B.1.1. Calidad del paisaje	100
C. Socio-económico (400 UI)	C.1. Población (400 UI)	C.1.3. Salud y seguridad	200
		C.1.4. Prevención de inundaciones	200
Total: 1 000 Unidades de Importancia			

4.6.2. Valoración de impactos ambientales

La magnitud del impacto se determinó mediante una valoración cuantitativa utilizando indicadores numéricos que inicialmente se obtuvieron en unidades heterogéneas, y mediante funciones de transformación se convirtieron en unidades homogéneas (UH). Esto permitió obtener una valoración numérica del impacto total producido.

En la valoración de los impactos ambientales ocasionados por el manejo de sedimentos se realizaron las siguientes actividades:

- Descripción de la actividad que genera el impacto
- Descripción general de los impactos identificados a partir del apartado 4.3 de la presente tesis
- Asignación de la función de transformación
- Determinación de la magnitud de cada impacto en unidades homogéneas (UH)
- Cálculo del valor de cada impacto a partir de la magnitud

A continuación se presentan las fichas técnicas donde se realizó la valoración de los impactos ambientales.

FICHA TÉCNICA 1		ETAPA: VALORACIÓN DE IMPACTOS
Jerarquía		Unidades de importancia
Medio:	A. Medio físico	500
Elemento:	A.1. Suelo	200
Factor ambiental:	A.1.1. Contaminación del suelo	200
Índice:	Concentración de metales pesados	

En la zona de transferencia, durante la desecación, los sedimentos se depositan sin previo tratamiento en una plancha de concreto para que los lixiviados escurran hacia un área permeable, posteriormente, el agua se evapora o se infiltra aumentando la concentración de metales pesados en el suelo.

La función de transformación aplicada al comportamiento del impacto ambiental en el suelo es una función lineal y se representa gráficamente en la Figura 4.10. El eje de las abscisas corresponde al índice de contaminación del suelo y el eje de las ordenadas corresponde a la magnitud del impacto en unidades homogéneas.

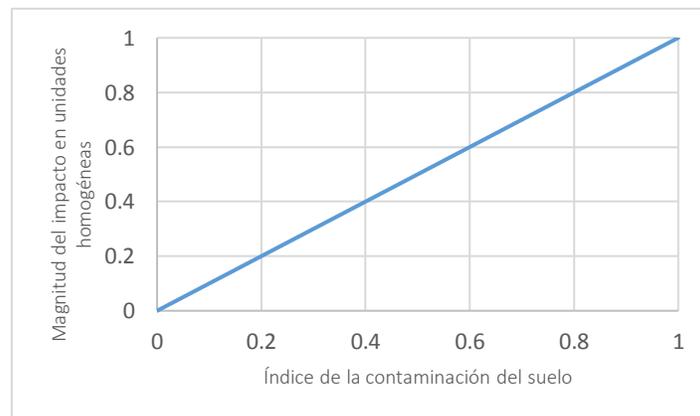


Figura 4.9. Función de transformación del factor: contaminación del suelo

De la gráfica anterior, el índice de contaminación del suelo resulta 0 cuando la entrada de sedimentos a la zona de transferencia es nula y conforme se acumulen sedimentos la magnitud del índice aumentará hasta llegar a 1, el cual corresponde a las

concentraciones de metales pesados establecidos como límites máximos permisibles por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

Para el cálculo del índice de la contaminación del suelo se propone la ecuación 4.1

$$I = \frac{\frac{x_{Pb}}{LMP_{Pb}} + \frac{x_{Cr}}{LMP_{Cr}} + \frac{x_{Cd}}{LMP_{Cd}}}{3}$$

Ecuación 4.1

Donde:

I= Índice de la contaminación del suelo

x= Concentración del metal en el suelo (mg/kg)

LMP= Límite máximo permisible de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (mg/kg)

Antes de calcular el índice de la contaminación del suelo, fue necesario estimar las concentraciones de metales pesados en el suelo de la zona de transferencia, éstas se propusieron con base en la caracterización de los sedimentos y en observaciones hechas en campo (Ecuación 4.2)

$$X_{metal} = \frac{Q_{sed} * Tiempo * X_{metal}^{sed} * humedad}{Vol_{suelo}}$$

Ecuación 4.2

Donde:

X_{metal}= Concentración del metal en el suelo (mg/kg)

Q_{sed}= Flujo de entrada de sedimentos a la zona de transferencia por día (m³/día)

Tiempo: Tiempo de operación de la zona de transferencia (días)

X_{metal,sed}= Concentración del metal en los sedimentos (mg/kg)

Humedad= Porcentaje de humedad de los sedimentos

Vol. Suelo= Volumen de suelo afectado (m³)

Los datos que se utilizaron para estimar la concentración de metales pesados en el suelo fueron:

- Flujo de entrada de sedimentos a la zona de transferencia 140 m³/día (estimado en la pág. 74)
- Tiempo de operación de la zona de transferencia: 1825 días (5 años)
- Concentración del metal en los sedimentos: Cadmio: 1.8 mg/kg, Cromo:14 mg/kg, plomo: 89 mg/kg (concentraciones promedio)
- Porcentaje de humedad de los sedientos: 43% (promedio)
- Volumen del suelo afectado 1000 m³ (área de secado de la zona de transferencia por 1 m de profundidad. A la profundidad de 1 m se encuentra un estrato no permeable (Carreón, 2011))

Los resultado de la aplicación de los datos anteriores en la ecuación 4.2 son:
 Cadmio: 19.8 mg/kg, Cromo: 153.8 mg/kg, Plomo: 977.8 mg/kg.

Para el cálculo del índice de la contaminación del suelo se usaron los límites máximos permisibles establecidos por la normatividad (Tabla 4.13) considerando un uso de suelo comercial.

Tabla 4.13. Concentraciones de referencia totales (CRt) por tipo de uso de suelo

Contaminante	Uso agrícola/ residencial/ comercial (mg/kg)	Uso industrial (mg/kg)
Cadmio	37	450
Cromo	280	510
Plomo	400	800

Fuente: NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

Cálculo del índice:

$$I = \frac{\frac{19.8}{37} + \frac{153.8}{280} + \frac{977.8}{400}}{3}$$

$$I = 1.18$$

La concentración de metales pesados en el suelo de la Zona de Transferencia excedió lo establecido en la normatividad, por esta razón, el índice de la contaminación del suelo sobrepasa el máximo establecido en la función de transformación, a pesar de lo anterior, la magnitud del impacto no puede ser mayor a 1 por lo que se determinó que para este factor la magnitud del impacto es de 1.00.

FICHA TÉCNICA 2		ETAPA: VALORACIÓN DE IMPACTOS
Jerarquía		Unidades de importancia
Medio:	A. Medio físico	500
Elemento:	A.2. Agua	100
Factor ambiental:	A.2.1. Calidad de aguas residuales	100
Índice:	Índice de la calidad del agua residual	

En la acción de almacenamiento temporal de sedimentos, los lixiviados se vierten al alcantarillado, esto se realiza por dos vías, la primera es cuando el camión hidroneumático regresa a su zona de resguardo y vierte los lixiviados al alcantarillado con el objetivo de tener más espacio en el tanque de almacenamiento y así, no trasladarse a la zona de transferencia por varios días. Por otra parte, los sedimentos extraídos mediante malacates son depositados sobre el pavimento de las calles a la orilla de una coladera pluvial, de modo que los lixiviados ingresen al alcantarillado para que pierdan humedad y sean fácilmente transportados a la zona de transferencia.

Las actividades anteriores modifican las características fisicoquímicas del agua residual debido a la alta concentración de contaminantes en los lixiviados.

La gráfica de la función de transformación aplicada al comportamiento del impacto ambiental a la calidad de aguas residuales es una línea recta con pendiente igual a 1, el eje de las abscisas representa el índice de la calidad de lixiviados y el eje de las ordenadas representa la magnitud del impacto en unidades homogéneas (Figura 4.11).

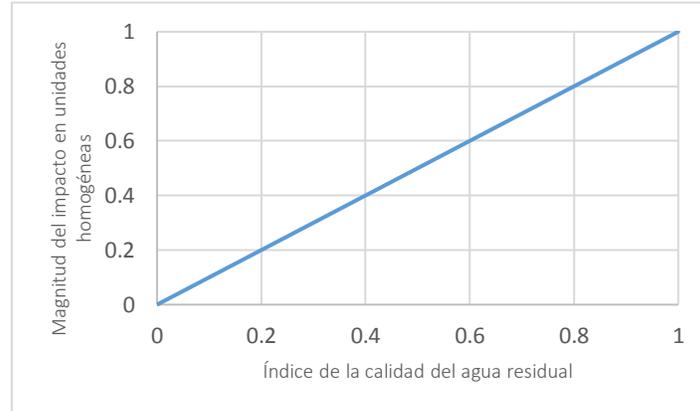


Figura 4.10. Función de transformación del factor: Calidad de aguas residuales

De la gráfica anterior, el índice de la calidad del agua residual valdrá 0 si no se vierten los lixiviados al alcantarillado, por otro lado, la afectación máxima en la calidad de las aguas residuales corresponde a verter lixiviados que excedan los límites máximos permisibles establecido por la NOM-002-SEMARNAT-1996, en este caso el indicador valdrá 1.

El índice de la calidad del agua residual incluye los parámetros siguientes: DBO, fósforo, cadmio, cromo y plomo.

Con base en lo anterior se propone la ecuación 4.3 para calcular el índice.

$$I = \frac{\frac{x_{Cd}}{LMP_{Cd}} + \frac{x_{Cr}}{LMP_{Cr}} + \frac{x_{Pb}}{LMP_{Pb}} + \frac{x_{Fósforo}}{LMP_{Fósforo}} + \frac{x_{DBO}}{LMP_{DBO}}}{5}$$

Ecuación 4.3

Donde:

I= Índice de la calidad del agua residual

X= Concentración del contaminante (mg/l)

LMP= Límite máximo permisible establecido por la NOM-002-SEMARNAT-1996 (mg/l)

Para calcular el índice, fue necesario estimar la concentración de metales pesados en los lixiviados, éste se realizó con base en la caracterización de los sedimentos (Ecuación 4.4).

$$X_{metal} = \frac{X_{metal}^{sed} * humedad * \rho_{sed}}{1000}$$

Ecuación 4.4

Donde:

X_{metal} = Concentración del metal en los lixiviados (mg/l)

$X_{metal, sed}$ = Concentración del metal en los sedimentos (mg/kg)

Humedad = Porcentaje de humedad de los sedimentos

ρ_{sed} = Densidad de los sedimentos (kg/m³)

Los datos que se utilizaron para estimar la concentración de metales fueron los siguientes:

- Concentración del metal en los sedimentos: cadmio: 1.8 mg/kg, cromo: 14 mg/kg, plomo: 89 mg/kg (concentraciones promedio)
- Porcentaje de humedad de los sedimentos: 43% (promedio)
- Densidad de los sedimentos: 2414 kg/m³ (promedio)

Los resultados de la aplicación de los datos anteriores a la ecuación 4.4 son: Cadmio: 1.9 mg/l, Cromo: 14.5 mg/l, Plomo: 92.4 mg/l.

Aunado a los resultados anteriores, los lixiviados presentan concentraciones de DBO y fósforo de 434.4 mg/l y 61.6 mg/l respectivamente (concentraciones promedio).

Para el cálculo del índice de la calidad del agua residual se usaron los límites máximos permisibles establecidos por la normatividad (Tabla 4.14) considerando una descarga diaria.

Tabla 4.14. Límites máximos permisibles de contaminantes

Parámetros	Promedio mensual (mg/l)	Promedio diario (mg/l)	Instantáneo (mg/l)
Cadmio	0.5	0.75	1
Cromo	0.5	0.75	1
Plomo	1	1.5	2
DBO	150	200	----
Fósforo	20	30	----

Fuente: NOM-002-SEMARNAT-1996

Cálculo del índice:

$$I = \frac{\frac{1.9}{0.75} + \frac{14.5}{0.75} + \frac{92.4}{1.5} + \frac{434.4}{200} + \frac{61.6}{30}}{5}$$

$$I = 17.5$$

La concentración de contaminantes en los lixiviados excedió lo establecido en la normatividad (Tabla 4.14), por esta razón, el índice de calidad del agua residual sobrepasa el máximo establecido en la función de transformación, a pesar de lo anterior, la magnitud del impacto no puede ser mayor a 1 por lo que se determinó que para este factor la magnitud del impacto es de 1.00.

FICHA TÉCNICA 3		ETAPA: VALORACIÓN DE IMPACTOS
Jerarquía		Unidades de importancia
Medio:	A. Medio físico	500
Elemento:	A.3. Aire	200
Factor ambiental:	A.3.1. Calidad del aire	200
Indicador:	Índice de la calidad del aire	

Son diversas las actividades que, durante las distintas acciones del manejo de sedimentos, van a tener alguna incidencia en la calidad del aire. Entre las más significativas se encuentran las siguientes:

- El uso de los motores de los camiones hidroneumáticos, de los equipos de malacates, de los equipos de transporte y de carga para el manejo de sedimentos.
- La alteración del tráfico como resultado de la obstrucción de los carriles por los equipos de desazolve y el montículo de sedimentos.

Todas estas acciones producen un cambio en la composición física y química del aire que se manifiesta principalmente en el aumento de ruido y de las concentraciones de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC's), óxidos de nitrógeno (NOx), plomo (Pb), y dióxido de azufre (SO₂) y partículas procedentes de la combustión interna de los motores de las máquinas.

Además, el reacomodo de los sedimentos en la zona de transferencia genera polvos, estas partículas afectan la calidad del aire, llegando en algunos casos a ocasionar daños a las vías respiratorias de los trabajadores y a contaminar los depósitos de agua potable de dicha zona.

La gráfica de la función de transformación aplicada a los impactos que afectan la calidad del aire, es una línea recta con pendiente igual a 1, el eje de las abscisas

representa el índice de calidad del aire y el eje de las ordenadas representa la magnitud del impacto en unidades homogéneas (Figura 4.12).

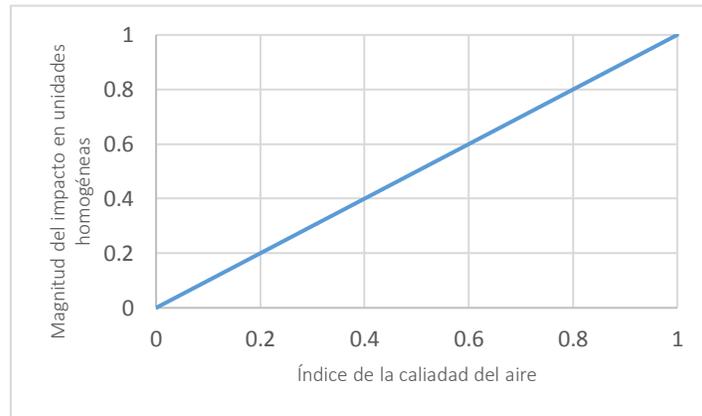


Figura 4.11. Función de transformación del factor: Calidad del aire

Para el cálculo numérico del índice de la calidad del aire se asignaron las puntuaciones de la Tabla 3.1 a cada atributo de las actividades que modifican la calidad del aire y se aplicó la ecuación 4.5

Cálculo del índice:

$$ICAire = \frac{(A + E + In + P + Rv + Rc) - \text{Valor mínimo}}{\text{Valor Máximo} - \text{Valor mínimo}}$$

Ecuación 4.5

Donde:

A= Acumulación

E= Extensión

In= Intensidad

P= Persistencia

Rv= Reversibilidad

Rc= Recuperabilidad

Cálculo del índice:

$$ICAire = \frac{(3 + 1 + 1 + 4 + 1 + 1) - 6}{25 - 6}$$

$$ICAire = 0.26$$

Con base en la función de transformación y el índice calculado se determinó que la magnitud del impacto es de 0.26.

FICHA TÉCNICA 4		ETAPA: VALORACIÓN DE IMPACTOS
Jerarquía	Unidades de importancia	
Medio:	B. Perceptual	100
Elemento:	B.1. Paisaje	100
Factor ambiental:	B.1.1. Calidad del paisaje	100
Indicador:	Incidencia visual	

Durante la acción de desecación, los sedimentos extraídos con los equipos de malacates son depositados sobre las calles por varios días. Estos montículos quedan sin las debidas medidas de señalamiento ocasionando accidentes y generando un mal aspecto.

La gráfica de la función de transformación asignada al comportamiento del impacto a la calidad del paisaje es una línea recta con pendiente igual a 1, el eje de las abscisas representa la incidencia visual y el eje de las ordenadas representa la magnitud del impacto en unidades homogéneas (Figura 4.13).

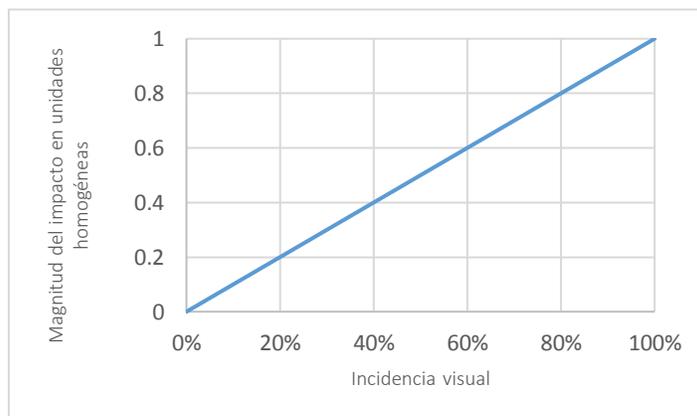


Figura 4.12. Función de transformación del factor: Calidad del paisaje

De la Figura 4.13 la incidencia visual valdrá el porcentaje de las personas que respondieron “sí” a una encuesta realizada durante los muestreos de sedimentos. Dicha encuesta consistió en preguntar a 50 personas lo siguiente:

¿El montículo de sedimentos depositado en la calle afecta el paisaje circundante?

Si () No()

A la pregunta anterior 28 personas contestaron “sí” y 22 contestaron “no”.

Con base en la función de transformación y la encuesta aplicada se determinó que la magnitud del impacto en unidades homogéneas es de 0.56.

FICHA TÉCNICA 5		ETAPA: VALORACIÓN DE IMPACTOS
Jerarquía	Unidades de importancia	
Medio:	C. Socio-económico	400
Elemento:	C.1. Población	200
Factor ambiental:	C.1.1. Salud y seguridad	200
Indicador:	Toxicidad aguda	

Un aspecto importante en el manejo de sedimentos es el contacto directo con los sedimentos del alcantarillado, este contacto tiene repercusiones en la salud de los operadores debido a la alta concentración de diversos contaminantes que aún son desconocidos, por tal motivo, la prueba de toxicidad que se realizó en la presente tesis es el indicador idóneo para medir el impacto generado en la salud de las personas.

La función de transformación asignada al factor salud y seguridad es una función escalón; en su forma gráfica (Figura 4.14), el eje de las abscisas representa el grado de toxicidad aguda y el eje de las ordenadas representa la magnitud del impacto en unidades homogéneas.

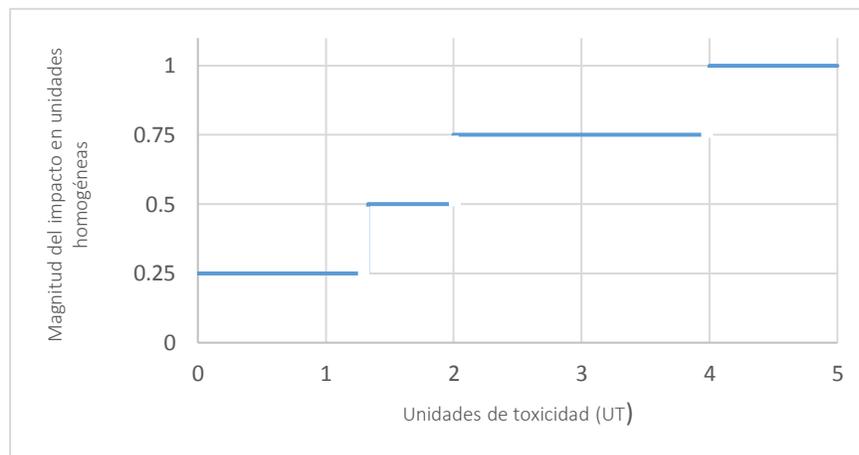


Figura 4.13. Función de transformación del factor: seguridad y salud

Fuente: Con base en Cruz, 2003

La función de transformación para el factor seguridad y salud está determinado por ecuación 4.6.

$$F_{FSS} = \begin{cases} UT < 1.33, & M_I = 0.25 \\ 1.33 \leq UT \leq 1.99, & M_I = 0.5 \\ 2 \leq UT \leq 4, & M_I = 0.75 \\ UT > 4, & M_I = 1.0 \end{cases}$$

Ecuación 4.6

Donde:

F_{FSS} = Función de transformación del factor salud y seguridad

UT = Unidades de toxicidad

M_I = Magnitud del impacto en unidades homogéneas

Con base en los resultados de toxicidad (Tabla 4.8) y en la función de transformación se determinó que la magnitud impacto para este factor es 0.75.

FICHA TÉCNICA 6		ETAPA: VALORACIÓN DE IMPACTOS
Jerarquía		Unidades de importancia
Medio:	C. Socio-económico	400
Elemento:	C.1. Población	400
Factor ambiental:	C.1.2. Prevención de inundaciones	200
Indicador:	Capacidad de transportar flujos	

La extracción de sedimentos del alcantarillado es una actividad que tiene como objetivo aumentar la capacidad de transportar flujos de una alcantarilla, esta actividad se realiza tanto en la red de colectores como en la red de atarjeas. Al ser extraídos los sedimentos del alcantarillado, el área transversal de una tubería aumenta y se reduce la rugosidad generada por la cama de sedimentos, lo anterior permite aumentar la capacidad de trasportar flujos y disminuir el riesgo de inundaciones.

La gráfica de la función de transformación aplicada a la prevención de inundaciones es una línea curva donde el eje de las abscisas representa el porcentaje del área de la tubería ocupado por los sedimentos y el eje de las ordenadas representa la magnitud del impacto en unidades homogéneas (Figura 4.15).

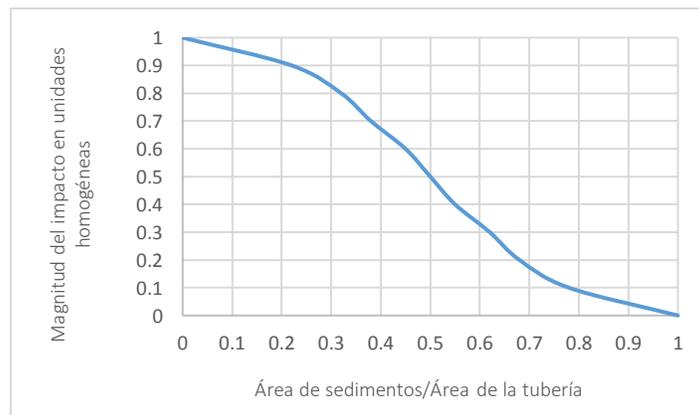


Figura 4.14. Función de transformación del factor: Inundaciones

Fuente: CONAGUA, 2009

De la Figura 4.15 se puede observar que la magnitud del impacto valdrá 1 cuando la capacidad de flujo sea máxima, es decir, la alcantarilla no tiene presencia de sedimentos (tirante de sedimentos nulo) y 0 cuando el área transversal ocupada por los sedimentos sea igual al área transversal de la alcantarilla.

Una alcantarilla después de ser desazolvada cuenta con una capacidad de flujo máxima, con base en lo anterior y en la función de transformación se determinó que la magnitud impacto para este factor es 1.

La Tabla 4.15 presenta la estimación del impacto ambiental del manejo de sedimentos, en la columna “Ponderación” se muestra el peso de los factores ambientales en unidades de importancia (UI) establecidos en la Tabla 4.12, en la columna “Magnitud del impacto” se resumen los resultados de la aplicación de las funciones de transformación en unidades homogéneas (UH), en esta columna el signo negativo representa impactos adverso y el signo positivo representa impactos benéficos. Por último, la columna “Valoración de impactos” muestra los resultados de la multiplicación de la ponderación y de la magnitud del impacto, en unidades de impacto ambiental (UIA).

Tabla 4.15. Valoración cuantitativa del impacto ambiental del manejo de sedimentos extraídos de la red de alcantarillado de la CDMX

Medio	Elemento	Factor	Ponderación (UI)	Magnitud del impacto (UH)	Valoración del impacto ambiental (UIA)
A. Físico	A.1. Suelo	Contaminación del suelo	200	-1	-200
	A.2. Agua	Calidad de aguas residuales	100	-1	-100
	A.3. Aire	Calidad del aire	200	-0.26	-53
B. Perceptual	B.1. Paisaje	Calidad del paisaje	100	-0.75	-75
C. Socio-económico	C.1. Población	Salud y seguridad	200	-0.75	-150
		Prevención de inundaciones	200	1	200
				Impacto total	-378

El impacto ambiental total en el año 2016 fue de -378 UIA, donde el signo negativo significa su carácter adverso.

En la Tabla 4.15, la calidad óptima de ambiente valdría +200 UIA y la destrucción total del ambiente equivaldría a un impacto total igual a -800 UIA, por otra parte, de no llevarse a cabo el desazolve de las alcantarillas la calidad ambiental valdría 0.

La tasa de disminución de la calidad ambiental durante el manejo de sedimentos fue de 42.2%, al pasar de +200 a -378 UIA.

El factor ambiental más afectado por el manejo de sedimentos fue el suelo seguido de la salud y la seguridad de la población, y posteriormente la calidad de las aguas residuales, por otra parte, el factor menos afectado fue la calidad del aire. Dos de los tres factores ambientales más afectados se deben a la inadecuada disposición de los lixiviados provenientes de los sedimentos.

Con base en la valoración cuantitativa de impactos se determinó que el impacto que genera el manejo de sedimentos es perjudicial y que la aplicación de las medidas de mitigación son necesarias.

Capítulo V. Medidas de mitigación de impactos ambientales del manejo de sedimentos

Este capítulo presenta las acciones preventivas y correctivas para mitigar los impactos ambientales generados por el manejo de sedimentos extraídos de la red de alcantarillado de la Ciudad de México.

Las acciones preventivas se abordan desde dos vertientes:

1. Diseño de sistemas de alcantarillados para evitar la deposición de sólidos.
2. Plan de limpieza de calles, coladeras, bocas de tormenta y presas de regulación para evitar la entrada de sólidos al alcantarillado.

Las acciones correctivas son varias y dependen de cada factor ambiental afectado, estas medidas se describen más adelante.

5.1. Propuestas de acciones para prevenir sedimentos en el alcantarillado

Se han propuesto diversos modelos conceptuales y matemáticos para representar el movimiento de sólidos dentro del alcantarillado, todos ellos han sido probados y validados para un escenario de condiciones específicas, sin embargo, la alta variabilidad de la naturaleza de los sólidos en el sistema de alcantarillado incrementa las dificultades para aplicar un modelo general de prevención de sedimentos.

A pesar de lo anterior, el diseño de las alcantarillas se ha hecho de manera convencional especificando una velocidad mínima de flujo denominada de "auto-limpieza" que se debe lograr a un tirante determinado de flujo o con una determinada frecuencia de ocurrencia. Aunque este enfoque parece haber tenido éxito en muchos casos, un único valor de velocidad mínima, sin relación con las características y concentración de sedimentos u otros aspectos del comportamiento hidráulico en la alcantarilla, no representa adecuadamente la capacidad de los flujos para transportar sólidos. En particular, se sabe que se necesita mayor velocidad de flujo para transportar una determinada concentración de sedimentos en alcantarillas.

También es importante tener en cuenta que las condiciones en las alcantarillas a gravedad son extremadamente variables. Los caudales y los sedimentos que ingresan en un sistema pueden variar considerablemente con el tiempo y el lugar, por lo que una alcantarilla diseñada para su "auto limpieza" en condiciones normales, es muy probable que sufra la deposición de sedimentos durante los períodos de flujo bajo y / o de alta carga de sólidos.

El método propuesto por Butler y Davies (2011) bien podría ser una medida de prevención de sedimentos. Éste fue desarrollado en un intento por relacionar la velocidad mínima con todos los factores que la afectan: tamaño de la tubería, rugosidad, tirante de flujo, granulometría de los sedimentos y su densidad, el grado de cohesión entre las partículas, la concentración de sólidos en el agua residual y la presencia de un lecho depositado. Este método no se define a detalle en la presente tesis pero si se desea profundizar en el tema se recomienda consultar el libro “Urban Drainage” de Butler y Davies (2011).

Por otra parte, la mayoría de los sedimentos se generan sobre la superficie de la cuenca y antes de que éstos ingresen al alcantarillado se pueden remover por varios medios: barrido de calles, limpieza de bocas de tormenta, limpieza de coladeras pluviales y desazolve de presas de regulación. Una medida para la prevención de sedimentos puede ser la planificación de las operaciones de mantenimiento. Esto reduciría el costo de la remoción de sedimentos mediante la concentración de los esfuerzos de limpieza en los puntos donde el costo es más bajo.

Aunado a lo anterior, una fuente importante de sólidos son los residuos de la construcción que, al finalizar la obra son depositados sobre las calles y en periodos de lluvias son lavados hacia el alcantarillado para posteriormente formar sedimentos. Una forma de evitar la entrada de este tipo de sólidos son campañas de concientización social para hacer cumplir las normas regulatorias que prohíben los depósitos de residuos en las calles.

5.2. Propuestas de acciones para el manejo de sedimentos

Es preciso partir de la premisa de que siempre es mejor no producir un impacto negativo que tener que corregirlo. Cualquier medida correctora supone un costo y debe tenerse en cuenta que dicha medida no suele eliminar completamente la alteración, sino sólo reducirla (César, 2007).

A continuación se presentan las medidas correctoras para mitigar los impactos ambientales en forma de fichas técnicas que, para su mejor entendimiento, contienen los factores ambientales que se verán beneficiados y la fase donde se aplicará la medida.

FICHA 1		ETAPA: MEDIDAS DE MITIGACIÓN	
Medio:	A. Medio físico	Elemento:	A.1. Suelo
Factor ambiental:	A.1.1. Contaminación del suelo		

1.- Extracción de sedimentos de la alcantarilla

Con esta acción los sedimentos no tienen contacto con el suelo de tal forma, no se considera necesaria ninguna medida de mitigación.

2.- Almacenamiento temporal de sedimentos extraídos

Prohibir el uso de los sedimentos como mejoradores de suelo.

En algunas ocasiones los sedimentos depositados en las calles son utilizados por los pobladores como mejoradores de suelos, sin embargo, las concentraciones de plomo en sedimentos superan lo establecido por Nriagu (1978) para suelos no contaminados. Por otra parte, las concentraciones de cadmio en sedimentos sobrepasan los niveles considerados como tóxicos para algunas especies vegetales (Aller y Deban, 1989), con base en lo anterior, los sedimentos del alcantarillado no deben ser utilizados como mejoradores de suelos.

3.- Transporte de sedimentos

Con esta acción no se generan impactos en el suelo, por consecuente, no se proponen medidas de mitigación.

4.- Desección de sedimentos

Construcción de una laguna de lixiviados.

La construcción de una laguna de lixiviados es la medida de mitigación más importante de este estudio y tiene la mayor relevancia para mitigar los impactos ambientales generados en el suelo. Como se determinó en la valoración de impactos ambientales, la contaminación del suelo en la zona de transferencia provoca el impacto con mayor valor, para prevenir lo anterior, se recomienda la construcción de una laguna de lixiviados dentro de la zona de transferencia en el área de secado.

La laguna tendrá como objetivo evitar el contacto entre los lixiviados y el suelo, también, mitigará parte del impacto en la calidad de las aguas residuales ya que los lixiviados contenidos en los camiones hidroneumáticos no serán vertidos al alcantarillado. En la presente tesis no se propone el diseño de dicha laguna ya que, queda fuera de los alcances de la investigación pero, con las características de los sedimentos determinadas en capítulos anteriores se podrán proponer las características de dicha laguna.

5.- Disposición final

Confinamiento de sedimentos en sitios controlados.

Para mitigar los impactos ambientales en esta acción, se recomienda que se asegure el confinamiento de sedimentos en sitios controlados. Con base en los resultados de Jiménez *et al.* (2004), los sedimentos se clasifican como residuos peligrosos, en consecuencia, estos no pueden disponerse como residuos sólidos.

FICHA 2		ETAPA: MEDIDAS DE MITIGACIÓN	
Medio:	A. Medio físico	Elemento:	A.2. Agua
Factor ambiental:	A.2.1. Calidad de aguas residuales		

1.- Extracción de sedimentos de la alcantarilla

Durante la extracción de sedimentos no se generan impactos en la calidad del agua residual, por consecuente no se proponen medidas de mitigación.

2.- Almacenamiento temporal de sedimentos extraídos

Establecer rutas de recolección de sedimentos.

Con esta acción, los lixiviados de los sedimentos son descargados al alcantarillado durante dos actividades. La primera es cuando los camiones hidroneumáticos llegan a su zona de resguardo y para tener más capacidad de extracción vierten los lixiviados al alcantarillado y la segunda actividad es cuando los equipos de malacates extraen los sedimentos y son colocados cerca de una coladera pluvial y así, los lixiviados ingresen al alcantarillado para que los sedimentos pierdan humedad y sean fácilmente transportados por el camión de volteo para, posteriormente, ser llevados a la zona de transferencia.

Con el propósito de mitigar lo anterior, se recomienda planificar las ubicaciones de los puntos de extracción con el fin de reducir la ruta de traslado. Velar por el diseño de rutas óptimas de recolección de residuos. Utilizar sistemas de transferencia cuando el transporte directo no sea económico, es decir, cuando el viaje supere 30 minutos o 15 km. Además de lo anterior, será necesario comprar dos camiones de volteo para recolectar los sedimentos extraídos por medio de equipos de malacates.

Esta medida de mitigación disminuye la alteración química, y biológica las de aguas residuales, así mismo, disminuye el impacto en la calidad del paisaje puesto que los montículos de sedimentos son recogidos rápidamente y no generan mal aspecto en la vialidad.

3.- Transporte de sedimentos

4.- Desecación de sedimentos

5.- Disposición final

Con estas acciones no se modifica la calidad del agua residual por lo que no es necesario establecer medidas correctoras.

FICHA 3		ETAPA: MEDIDAS DE MITIGACIÓN	
Medio:	A. Medio físico	Elemento:	A.3. Aire
Factor ambiental:	A.3.1. Calidad del aire		

1.- Extracción de sedimentos de la alcantarilla

Programa de mantenimiento preventivo a los equipos mecánicos.

El uso de los equipos usados en el desazolve de alcantarillados generan gases de efecto invernadero, una forma de disminuirlos es establecer un programa de mantenimiento preventivo, de manera que se reducirá la emisión de dichos gases. El programa de mantenimiento dependerá de cada equipo y de su uso.

Aunado a lo anterior todos los camiones deben cumplir con el programa de verificación de la Ciudad de México.

Laborar en el horario de 6:00 a 22:00.

En este horario la NOM-081-SEMARNAT-1994 establece un límite máximo permisible mayor al de otros horarios. Cabe mencionar que el ruido generado por los equipos de desazolve no se consideró significativo.

Uso eficiente de los equipos.

Promover la minimización del uso de combustibles solicitando a los operadores que apaguen los motores cuando no sean usados.

2.- Almacenamiento temporal de sedimentos extraídos

Ubicar los montículos de sedimentos en calles con bajo flujo vehicular.

Los sedimentos extraídos con los equipos de malacates se almacenan temporalmente sobre las calles afectando la circulación vehicular, al ubicar los montículos de sedimentos en calles no transitadas se evita la alteración del flujo vehicular.

3.- Transporte de sedimentos

Trasladar los sedimentos en camiones cerrados.

Se recomienda trasladar los sedimentos en camiones cerrados para evitar producción de polvos.

4.- Desecación de sedimentos

Con esta acción no se generan impactos en el aire, por consecuente no se proponen medidas de mitigación.

5.- Disposición final

Las mismas medidas descritas en la acción 1.

FICHA 4		ETAPA: MEDIDAS DE MITIGACIÓN	
Medio:	B. Perceptual	Elemento:	B.1. Paisaje
Factor ambiental:	B.1.1. Calidad del paisaje		

1.- Extracción de sedimentos de la alcantarilla

La extracción de sedimentos no alteran la calidad del paisaje por lo que no son necesarias medidas de mitigación.

2.- Almacenamiento temporal de sedimentos extraídos

Plan de recolección de sedimentos.

Medida de mitigación anteriormente descrita.

3.- Transporte de sedimentos

Con esta acción no se generan impactos ambientales significativos por consecuente no se proponen medidas de mitigación.

4.- Desección de sedimentos

La Zona de Transferencia cuenta con un bordo perimetral que mitiga los impactos generado en la calidad del paisaje por tal razón, los montículos de sedimentos no generan impactos ambientales significativos.

5.- Disposición final de sedimentos

Con esta acción no se generan impactos ambientales significativos por consecuente no se proponen medidas de mitigación.

FICHA 5		ETAPA: MEDIDAS DE MITIGACIÓN	
Medio:	C. Socio-económico	Elemento:	C.1. Población
Factor ambiental:	C.1.3. Salud y seguridad		

1.- Extracción de sedimentos de la alcantarilla

Uso de equipo de protección sanitaria.

Una de las medidas de mitigación para los impactos ambientales generados en la salud de las personas es el uso de equipo de protección personal, como: guantes de carnaza, cubre bocas, tapa oídos, ropa de mezclilla que cubra todo el cuerpo, casco, y botas de casquillo, además se recomienda evitar, en la medida de lo posible, el contacto con los sedimentos.

Capacitación de higiene y seguridad al personal de operación.

Se recomienda llevar a cabo una capacitación de higiene y seguridad laboral en el área de trabajo. El objetivo de las capacitaciones es concientizar a los operadores sobre la importancia del uso del equipo de protección.

Ventilar el pozo de visita antes de trabajar.

Una de las funciones de los pozos de visita es ventilar el alcantarillado por lo que de ellos se emiten distintos gases que, en ciertas condiciones, representan un riesgo a la salud, con base en lo anterior, se recomienda que al ser destapados los pozos de visita se deje ventilar por lo menos un minuto antes de hacer cualquier actividad dentro o cercana al pozo.

2.- Almacenamiento temporal de sedimentos extraídos

Colocar señalamientos de tránsito en los montículos de sedimentos.

Los montículos formados por el almacenamiento de sedimentos durante la noche no son visibles por los automovilistas y éstos pueden provocar accidentes, por tal motivo se recomienda colocar señalamiento preventivo en todo momento mientras el montículo quede sobre las calles.

3.- Transporte de sedimentos

Uso de equipo de protección personal.

Medida de mitigación anteriormente descrita.

4.- Desecación de sedimentos

Negar el acceso a personas no autorizadas a la estación de transferencia.

Se observaron personas buscando objetos de valor en los montones de sedimentos, lo cual puede causar problema para su salud, por lo que se recomienda negar el acceso a personas ajenas al SACMEX.

Construcción de instalaciones para los operadores y vigilantes.

Se recomienda realizar la infraestructura necesaria para que los operadores de los camiones y los vigilantes de la zona de transferencia puedan satisfacer las necesidades sanitarias durante su horario de trabajo. Esta infraestructura debe contar con un baño completo y un comedor con instalaciones hidrosanitarias adecuadas ya que actualmente su depósito de agua potable está expuesto a los polvos producidos por el movimiento de sedimentos.

5.- Disposición final de sedimentos

Con esta acción no se generan impactos ambientales significativos por consecuente no se proponen medidas de mitigación.

Después de la aplicación de las medidas de mitigación se debe proponer el manejo integral de los sedimentos considerando su reactividad (Jiménez *et al.*, 2004), el cual combina métodos de recolección y procesamiento, de lo cual derivan beneficios ambientales, optimización económica y aceptación social en un sistema de manejo práctico para cualquier región. Esto se puede lograr combinando opciones de manejo que incluyen esfuerzos de reciclaje, tratamientos que involucran incineración con recuperación de energía, macro-encapsulación, solidificación, etcétera. El punto clave no es cuantas opciones de tratamiento se utilicen, o si se aplican todas al mismo tiempo, sino que sean parte de una estrategia que responda a las necesidades y contextos locales o regionales, así como a los principios básicos de las políticas ambientales en la materia.

Existen estudios que comprueban la viabilidad del uso de sedimentos para la producción de concreto, sin embargo, para el caso de la Ciudad de México, se propone la discusión relacionada con la viabilidad del tratamiento y su aprovechamiento, esto sin olvidar los tres ejes principales de la sustentabilidad.

Capítulo VI. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

En este trabajo se evaluó el impacto ambiental del manejo de los sedimentos extraídos de la red de alcantarillado de la Ciudad de México. La metodología propuesta incluyó tres fases, en la primera se identificaron los impactos, en la segunda fase se realizó la valoración de impactos y en la última, se propusieron medidas de prevención y mitigación de impactos. Como parte central de esta investigación, se realizó la caracterización de los sedimentos del alcantarillado, sin esta caracterización la elaboración del trabajo no hubiera sido posible. Las conclusiones se presentan con el mismo orden en el que se llevaron a cabo las fases, es decir: identificación de impactos ambientales, evaluación de impactos ambientales y propuesta de medidas de mitigación.

Conclusiones de la identificación de impactos ambientales

- La acumulación de sedimentos en el alcantarillado de la Ciudad de México se debe principalmente a los siguientes factores: taponamiento de la alcantarilla por basura, obstrucción de la alcantarilla por raíces, solidificación de grasas y aceites dentro del alcantarillado, cambios de pendientes en el sistema de alcantarillado y a la entrada del suelo debido al deterioro y derrumbe de las tuberías.
- En la Ciudad de México se extraen sedimentos mediante equipos hidroneumáticos y equipos de malacates, siendo estos últimos los más efectivos para el desazolve del alcantarillado.
- El árbol de factores propuesto para la evaluación de impacto ambiental no es exhaustivo y se le pueden señalar omisiones relevantes; sin embargo, los factores que se consideraron fueron con base en la información bibliografía y de campo. Además, se procuró que fueran relevantes y fáciles de identificar.
- Se reconocieron interacciones entre las distintas actividades del manejo de sedimentos con diversos componentes ambientales, de las cuales se identificaron potenciales impactos ambientales en el suelo y en la calidad del agua, y se evaluó su significancia utilizando la Matriz de Leopold, con esta herramienta se pudo discriminar a los factores: calidad de los olores, nivel de ruidos y obstrucción de vialidades. Se concluye que es relevante la aplicación de la herramienta “identificación de efectos ambientales” dado que se pudo estudiar a fondo los factores significativos.
- El estrato A tuvo mayor concentración de DBO, DQO, contenido orgánico y ortofosfatos que el estrato B. Lo anterior se debe a que el estrato B tiene un mayor tiempo de permanencia en la alcantarilla que el estrato A y consecuentemente,

origina una mayor degradación de la materia orgánica en el estrato B, en contraste, la concentración de metales pesados fue mayor en el estrato B. Con base en lo anterior, se confirma la existencia de dos estratos de sedimentos dentro de una alcantarilla.

- Los sedimentos de la Ciudad de México se clasifican en arenas mal graduadas con grava y pocos finos (SP) según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).
- Las variaciones de concentraciones de contaminantes en los sedimentos están relacionadas con la calidad del agua residual que fluye en la alcantarilla, ésta a su vez, está en función del uso de suelo del área drenada. En su mayoría, la Ciudad de México está integrada por 3 usos de suelo: industrial, comercial y habitacional, las concentraciones de los contaminantes determinados en el presente estudio disminuyen respectivamente.
- Debido a la complejidad del alcantarillo sanitario de la Ciudad de México, es imposible determinar la cantidad de sedimentos presentes en el sistema, sin embargo, con base en las observaciones de campo se estima que la cantidad de sedimentos en la red de colectores es de aproximadamente 450,601 m³, la cantidad anterior, se calculó considerando tuberías de 1.2 m de diámetro, tirantes de sedimentos de 0.3 m y una longitud total de colectores de 2, 038,000 m.
- Las concentraciones de plomo en sedimentos superaron lo establecido por Nriagu (1978) para suelos no contaminados. Por otra parte, las concentraciones de cadmio en sedimentos sobrepasaron los niveles considerados como tóxicos para algunas especies vegetales tales como Beta vulgaris (Betabel), Raphanus sativus (Rabano) y Oryza sativa (Arroz) (Aller y Deban, 1989), con base en lo anterior, los sedimentos del alcantarillado no deben ser utilizados como mejoradores de suelos.

Conclusiones de la evaluación de impactos ambientales

- La aplicación de índices e indicadores en las funciones de transformación aumentaron la confiabilidad de la valoración de impactos en comparación con la aplicación de otras metodologías.
- El factor ambiental más afectado por el manejo de sedimentos fue el suelo, seguido de la salud y la seguridad de la población y posteriormente la calidad de las aguas residuales, por otra parte, el factor menos afectado fue la calidad del aire. Dos de los tres factores ambientales más afectados se debe al inadecuado tratamiento de los lixiviados provenientes de los sedimentos.
- La tasa de disminución de la calidad ambiental durante el manejo de sedimentos fue de 42.2%, al pasar de +200 a -378 UIA.

Conclusiones de las medidas de mitigación

- Existen diversos modelos matemáticos (CIRIA, velocidad mínima, etcétera) para diseñar alcantarillados con el fin de prevenir la deposición de sólidos, sin embargo, estos modelos aún son desconocidos por las autoridades mexicanas y en consecuencia, se limita la aplicación de éstos.
- El barrido de calles, limpieza de bocas de tormenta, limpieza de coladeras pluviales, desazolve de presas de regulación y la prohibición de los depósitos de los residuos en calles, bien podrían ser las medidas de prevención más significativas para reducir los impactos ambientales.
- La construcción de una laguna de lixiviados diseñada para su tratamiento, es la medida de mitigación más impórtate de este estudio. La laguna tendrá como objetivo evitar el contacto entre los lixiviados y el suelo, también, mitigará parte del impacto en la calidad de las aguas residuales ya que los lixiviados contenidos en los camiones hidroneumáticos no serán vertidos al alcantarillado.
- Será necesario comprar dos camiones de volteo para establecer rutas de recolección de sedimentos óptimas, con el objetivo de disminuir los impactos en la calidad del paisaje y el agua residual. Además, se aumentará la extracción de sedimentos ya que los operadores de los malacates podrán trabajar horarios completos y todos los días laborables puesto que sus labores no serán interrumpidas por los vecinos inconformes debido al mal aspecto que genera el montículo de sedimentos en su colonia.

Recomendaciones

Para futuros estudios se recomienda lo siguiente:

- El procedimiento usado en el muestreo fue adecuado debido que las muestras fueron representativas. Se recomienda analizar los sedimentos extraídos por medio de equipos de malacates, así como aplicar el método de cuarteo y preservar las muestras como se indica en el presente trabajo.
- Las muestras de sedimentos obtenidas en la Ciudad de México tuvieron concentraciones de contaminantes hasta 1000% mayores que la muestra obtenida en la ciudad de Acapulco, Guerrero, por tal motivo, se recomienda que al aplicar la metodología propuesta en el presente trabajo en lugares diferentes a la Ciudad de México se realice un muestreo y una caracterización de sedimentos.
- Se reconoce que la determinación de grasas y aceites, contenido orgánico, densidad, granulometría y coliformes fecales no se aplicaron como indicadores ambientales. Por la razón antes expuesta, se recomienda no realizar las pruebas anteriormente indicadas.
- Cada factor ambiental es sólo una parte del medio, por lo que asignó a cada factor un peso, ponderación o índice de importancia distribuyendo una cantidad de 1000 unidades ambientales, que indican la importancia total del ambiente. La ponderación de cada factor debe ser recalculada si se pretende extrapolar la metodología a otros casos de manejo de sedimentos en otras entidades federativas, debido principalmente a las variaciones de concentraciones de contaminantes en los sedimentos.
- Se recomienda que, en futuros trabajos, se realice la prueba de reactividad para corroborar que los sedimentos extraídos del alcantarillado por actividades de mantenimiento son reactivos y se proponga un manejo de residuos peligrosos.

Referencias

- Ackers, J.C., Butler, D. and May, R.W.P. (1996). Design of Sewers to Control Sediment Problems, CIRIA R141.
- Aller, A. y Deban, L. (1989). Total and extractable contents of trace metals in agricultural soils of the Valderas area, Spain. *The Science of the Total Environment*, 79, 253-270.
- APHA. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Edition 20. APHA/AWWA/WPCF.
- Ashley, R.M. y Crabtree, R.W. (1992). Sediment origins, deposition and build-up in combined sewer systems. *Water Science and Technology*, 25(8), 1-12.
- Ashley, R.M., Arthur, S., Coghlan, B.P. and McGregor, I. (1994). Fluid sediment in combined sewers. *Water Science and Technology*, 29(1-2), 113-123.
- Ashley, R.M., J.-L. Bertrand-Krajewski, T. Hvitved-Jacobsen, and M. Verbanck. (1999). Solids in Sewers: Characteristics, Effects and Control of Sewer Solids and Associated Pollutants. SS&PWG of IAWQ/IAHR Joint Committee on Urban Drainage.
- ASHRAE. (2006). American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Standing Standard Project Committee
- ASTM-C128. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM-C566-97. (2004). Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM-D2487. (2006). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM-D2974. (2014). Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM-D422. (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Barba L. E. (2002). Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de medición. Universidad del Valle, Facultad de Ingenierías, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Área Académica Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Santiago de Cali 2002.
- Bertrand-Krajewski, J.-L., Briat, P.M. y Scrivener, O. (1993). Sewer sediment production and transport modelling: a literature review. *Journal of Hydraulic Research*, 31(4), 435-460.
- Binnie & Partners y Hydraulics Research (1987). Sediment Movement in Combined Sewerage and Storm-Water Drainage Systems, CIRIA PR1.
- Boon, A.G. (1995) Septicity in sewers: Causes, consequences and containment. *Water Science and Technology* 31(7), 237-253.
- Butler, D. y John, W. Davies (2011). Urban Drainage, Chapter 17: Sediments, 3rd ed, Spon Press.

- Butler, D., Thedchanamoorthy, y J. A. Payne (1992). Aspects of surface sediments characteristics on an urban catchment in London. *Water Science and Technology*, 25(8), 13–19.
- Canter, L. W. (1977). *Environmental Impact Assessment*. United States of America: McGraw-Hill.
- Carreón D. C. (2011). Identificación y caracterización de los diferentes tipos de fracturas que afectan el subsuelo de la Delegación Iztapalapa del Distrito Federal. *Academia de Ingeniería*. CDMX. Pag. 26
- César, E. (2007). Saneamiento básico y urbanización de asentamientos humanos irregulares en el Suelo de Conservación del DF. Tesis doctoral, Programa de Maestría y Doctorado en Urbanismo, UNAM.
- Chebbo, G. (1992). Solides Des Rejets Pluviaux Urbains Caractérisation et Traitabilité. Ph.D. thesis, L'École Nationale Des Ponts et Chaussées.
- Chebbo, G. y Bahoc, A. (1992). Characteristics of suspended solids in urban wet weather discharges. *Water Science and Technology*, 25(8), 171–179.
- CONAGUA. (2009). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Alcantarillado sanitario*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Crabtree, R.W. (1989). Sediments in sewers. *Journal of the Institution of Water and Environmental Management*, 3, December 569–578.
- Crabtree, R.W. y Forster, C.F., (1989). Preparation protocols for the analysis of combined sewer sediment samples. WRc Report ER 354E, Water Research Centre, Swindon.
- Crabtree, R.W., Ashley, R.M. y Saul, A.J. (1991) Review of Research into Sediments in Sewers and Ancillary Structures, Report No. FR0205, Foundation for Water Research.
- Cruz, A. (2003). Degradación de colorantes dispersos tipo monoazo a través de un proceso anaerobio/aerobio. Tesis doctoral, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM. Pag.128
- DGCOH. (2003). Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Plan Maestro de Drenaje de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México 1994-2010. México. Departamento del Distrito Federal.
- EPA. (1999). Limpieza e inspección de tuberías. Folleto informativo de operación y mantenimiento del alcantarillado. Septiembre de 1999.
- Estevan, M. (1977). Las evaluaciones de impacto ambiental. Centro Internacional de Formación en Ciencias Ambientales (CIFCA), COIMOFF.
- García, R. (2007). Determinación de metales pesados en la precipitación pluvial de una zona urbana (Ciudad de México) y de una zona rural (Rancho Viejo, Edo. de México). Tesis doctoral, Posgrado en ciencias de la tierra, UNAM.
- Garmendia, A., Salvador, A., Crespo, C., Garmendia, L. (2005). *Evaluación de impacto ambiental*. PEARSON Prentice Hall.
- Hansen, A. M. (2015, octubre 4). Desarrollan tecnología para la recuperación de fósforo en el agua. (C. Báez, Interviewer).
- Hernández, F. (2016) Análisis de ciclo de vida como herramienta de decisión para el tratamiento de agua residual en América Latina y el Caribe. Tesis doctoral, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM.

- Jiménez, B., Méndez, J.M., Barrios, J.A., Salgado, y G., Sheinbaum, C. (2004). Characterization and evaluation of potential reuse options for wastewater sludge and combined sewer system sediments in Mexico. *Wat. Sci. Tech.*, 49 (10), 171-178.
- Juárez, E. y Rico A. (2005). *Mecánica de suelos. Tomo 1: fundamentos de mecánica de suelos.* Limusa. 77.
- Martínez, P. (1967). Algunos aspectos del alcantarillado y drenaje en México, *Boletín de la oficina sanitaria panamericana*, Octubre, 330-336.
- May, R.W.P. (1993) *Sediment Transport in Pipes and Sewers with Deposited Beds*, Report SR 320, HR Wallingford.
- Michelbach, S. (1995). Origin, resuspension and settling characteristics of solids transported in combined sewage. *Water Science and Technology*, 31(7), 69-76.
- NMX-AA-112-SCFI-1994. Norma Mexicana. Análisis de agua y sedimentos – evaluación de toxicidad aguda con *photobacterium phosphoreum* – método de prueba.
- NOM-002-SEMARNAT-1996. Norma Oficial Mexicana. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
- NOM-004-SEMARNAT-2002. Norma Oficial Mexicana. Protección Ambiental.- Lodos Y Biosólidos.-Especificaciones Y Límites Máximos Permisibles De Contaminantes Para Su Aprovechamiento Y Disposición Final.
- NOM-052-SEMARNAT-2005. Norma Oficial Mexicana. Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.
- NOM-081-SEMARNAT-1994. Norma Oficial Mexicana. Que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición.
- NOM-087-ECOL-SSA1-2002. Norma Oficial Mexicana. Protección ambiental - Salud ambiental - Residuos peligrosos biológico-infecciosos - Clasificación y especificaciones de manejo.
- NOM-147-SEMARNAT_SSA1-2004. Norma Oficial Mexicana. Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
- NOM-161-SEMARNAT-2011. Norma Oficial Mexicana. Que establece los criterios para clasificar a los residuos de manejo especial y determinar cuáles están sujetos a plan de manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo.
- Nriagu, J. (1990). Global metal pollution. *Poisoning the biosphere Environment*, 32, 28-33.
- Oropeza, N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos Conciencia* 1: 51-58.

- Ramos, A. (1987). Diccionario de la naturaleza. Hombre, ecología, paisaje. Madrid: Espasa.
- Rau, J. (1980). Environmental impact analysis handbook. Edition 1. Mc Graw-Hill
- Ristenpart, E. (1995). Sediment properties and their changes in a sewer. *Water Science and Technology*, 31(7), 77–83.
- SACMEX. (2012). El gran reto del agua en la Ciudad de México. Pasado, presente y perspectivas de solución para una de las ciudades más complejas del mundo. Ciudad de México: Offset Santiago, S.A.
- Schlütter, F. (1999). Numerical Modelling of Sediment Transport in Combined Sewer Systems. PhD thesis, The Hydraulics and Coastal Engineering Group, Department of Civil Engineering, Aalborg University.
- Schmitt, F. and Seyfried, C.F. (1992). Sulfate reduction in sewer sediments. *Wat. Sci. Tech.*, 25(8), 83–90. SSA (2001). Epidemiología. Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica. No. 2, Vol. 18, Week 2. ISSN 1405–2636. 7–13 January. In Spanish.
- SEDUVI. (2008). Secretaria de Desarrollo Urbano y Vivienda. Programa delegacional de desarrollo Urbano, Administración Pública del Distrito Federal. Ciudad de México: Gaceta Oficial del Distrito Federal.
- Skoog, D; West, D; Holler, F; Crouch S. (2005). Fundamentos de química analítica 8ª. Edición, Thomson.
- Verbanck, M.A. (1995). Capturing and releasing settleable solids – the significance of dense undercurrents in combined sewer flows. *Water Science and Technology*, 31(7), 85–93.
- Xanthopoulos, C. y Augustin, A. (1992). Input and characterization of sediments in urban sewer systems. *Water Science and Technology*, Vol 31(1), 187–196.
- Zárate, R. (2013). Tesina “Proyecto de sustitución de la red de alcantarillado sanitario en el barrio de Santiago de la Ciudad de Puebla”. Facultad de Ingeniería. UNAM.

Fichas técnicas de la descripción de los factores ambientales.

FICHA TÉCNICA 1		ETAPA: INVENTARIO AMBIENTAL
Medio:	A. Físico	Factor ambiental:
Elemento:	A.1. Suelo	A.1.1. Contaminación del suelo

Al suelo, desde el punto de vista edafológico, usado por agrónomos, forestales, etc., se le puede dar la definición acuñada por el Soil Survey Staff en 1951:

El suelo es el conjunto de unidades naturales que ocupan las partes de la superficie terrestre que soporten las plantas, y cuyas propiedades se deben a los efectos combinados del clima y de la materia viva sobre la roca madre, en un periodo de tiempo y un relieve determinado.

Como parte del manejo de sedimentos, éstos son almacenados temporalmente en la zona de tiro localizada en la Delegación Iztapalapa, en esta zona los sedimentos drenan lixiviados, una parte del agua se evapora y otra se infiltra, en el último caso los lixiviados pueden producir concentraciones de contaminantes por arriba de las establecidas para suelos aprovechables.

La zona de transferencia se encuentra dentro de un vaso regulador de aguas residuales que, según la Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda (SEDUVI, 2008), tiene el uso de suelo para Equipamiento Urbano (Figura A.1). Es importante considerar el uso de suelo, ya que con base en esto se establecerán los límites máximos permisibles de concentraciones de contaminantes en dicho suelo.

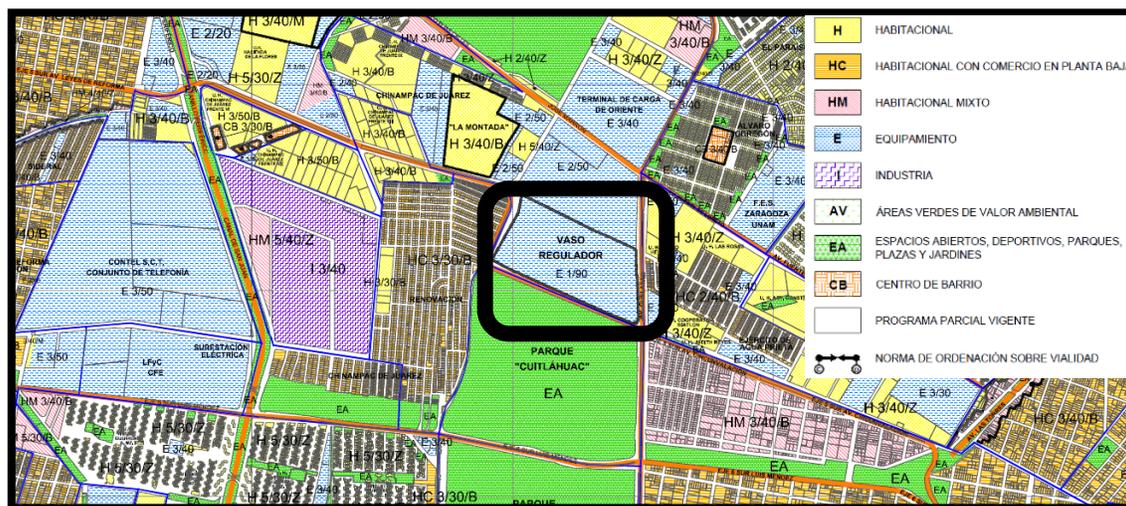


Figura A.1. Uso de suelo de la zona de transferencia

FICHA TÉCNICA 2		ETAPA: INVENTARIO AMBIENTAL
Medio:	A. Físico	Factor ambiental:
Elemento:	A.2. Agua	A.2.1. Calidad de aguas residuales

La medida de la calidad del agua se puede hacer mediante estándares en función del uso que se le vaya a dar o en la alteración de concentración de contaminantes por alguna actividad u obra.

El alcantarillado de la Ciudad de México transporta agua pluvial y agua residual de tipo doméstico, comercial e industrial, estas aguas tienen valores típicos promedio los cuales se mostraron en el apartado 2.3., sin embargo, en una investigación realizada por Binnie *et al.* (1987) se observó que la carga contaminante en periodos de lluvia puede incrementarse hasta un 400% por el arrastre de sedimentos.

Por otra parte, durante el manejo de sedimentos los lixiviados son vertidos al alcantarillado, aumentando la concentración de contaminantes en las aguas residuales.

FICHA TÉCNICA 3		ETAPA: INVENTARIO AMBIENTAL
Medio:	A. Físico	Factor ambiental:
Elemento:	A.3. Aire	A.3.1. Calidad del aire

Se entiende por calidad del aire al conjunto de concentraciones de los diferentes contaminantes atmosféricos en un periodo de tiempo y lugar determinado. Los contaminantes atmosféricos son cualquier sustancia o forma de energía cuya presencia en el aire pueda implicar efectos molestos o nocivos para la salud de las personas y organismos vivos, así como para los recursos naturales y los bienes en general (Canter, 1977).

El manejo de sedimentos produce contaminantes atmosféricos durante su extracción y transporte emitidos por los motores de los malacates, del camión hidroneumático y del camión volteo.

Las emisiones de gases de los equipos de malacates son generadas durante el tiempo de operación, mientras que las emisiones de gases por parte de los camiones que trasladan los sedimentos varía en función de las distancias recorridas o del tiempo de uso de dicho camión.

FICHA TÉCNICA 4		ETAPA: INVENTARIO AMBIENTAL
Medio:	A. Físico	Factor ambiental:
Elemento:	A.3. Aire	A.3.2. Nivel de ruido

Todo sonido indeseable que moleste o perjudique a las personas es considerado como ruido. La NOM-081-SEMARNAT-1994 establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de fuentes fijas y su método de medición.

Los motores de los equipos de desazolve (hidroneumáticos y malacates) generan ruido durante la extracción de sedimentos, además, en la estación de transferencia se usa un cargador frontal durante 8 horas para acumular los sedimentos en el área de almacenamiento, éste también genera ruido.

FICHA TÉCNICA 5		ETAPA: INVENTARIO AMBIENTAL
Medio:	B. Perceptual	Factor ambiental:
Elemento:	B.1. Paisaje	B.1.1. Calidad del paisaje

El paisaje está considerado como la expresión perceptual de medio físico, lo que implica que es detectado por todos los sentidos, es decir, es función de la percepción plurisensorial. Esto implica que su tratamiento debe contar con la forma de apreciarse con la vista, el olfato y el oído (Garmendia *et al.*, 2005).

Durante la actividad de desazolve de las alcantarillas con los equipos de malacates, los sedimentos son depositados sobre la calle modificando el paisaje debido al montículo (Figura A.2). Por otra parte, en la zona de transferencia los sedimentos no generan mal aspecto debido a que esta área cuenta con un bordo perimetral, el cual impide que sean observables los montículos de sedimentos.



Figura A.2. Afectación a la calidad del paisaje

FICHA TÉCNICA 6		ETAPA: INVENTARIO AMBIENTAL
Medio:	B. Perceptual	Factor ambiental:
Elemento:	B.1. Paisaje	B.1.2. Olores

El olor es la sensación producida por la interacción de moléculas volátiles con las células que forman la pituitaria. El olor se caracteriza por su intensidad, calidad, aceptabilidad y por su umbral de olor.

Existen diferentes métodos para establecer la fuerza relativa de un olor. Algunos, como el propuesto por la American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) define una escala: 0 = sin olor o justo reconocible, 1 = olor ligero, 2 = olor moderado y 3 = olor fuerte.

Durante la extracción de los sedimentos, estos son depositados sobre las calles hasta por una semana por lo que los vecinos circundantes al montículo se empiezan a quejar por los malos olores, aunado a lo anterior, los habitantes que viven alrededor de la zona de transferencia se quejan de los malos olores por lo que los operadores agregan cal hidratada a los sedimentos depositados en la zona de transferencia.

FICHA TÉCNICA 7		ETAPA: INVENTARIO AMBIENTAL
Medio:	C. Socio-económico	Factor ambiental:
Elemento:	C.1. Población	C.1.1. Obstrucción de vialidades

El transporte produce impactos ambientales, los principales agentes productores de estos impactos son: ruido y emisiones de gases de efecto invernadero. La obstrucción de vialidades incrementa los impactos ambientales en comparación a una vialidad sin obstrucciones.

Para ser extraídos los sedimentos se colocan equipos sobre la calle deshabilitando un carril y consecuentemente esta acción disminuye la capacidad de flujo vehicular (Figura A.3), aunado a lo anterior, la ocupación de la calle por el montículo de los sedimentos que son extraídos por los malacates también obstruyen el flujo vehicular.

Al disminuir la capacidad de flujo, se modifica el tiempo de traslado del vehículo aumentado la emisión de gases. Esta emisión de gases es proporcional al tiempo de retraso de los automóviles.

El ruido generado por los automóviles cuando se obstruye la vialidad no se altera ya que el flujo de autos es el mismo.



Figura A.3. Afectación a las vialidades

FICHA TÉCNICA 8		ETAPA: INVENTARIO AMBIENTAL
Medio:	C. Socio-económico	Factor ambiental:
Elemento:	C.1. Población	C.1.2. Salud y seguridad

El manejo inadecuado de los sedimentos genera problemas de salud en muchos sentidos, todas las personas que están en contacto con los sedimentos se encuentran expuestas a infecciones debido a las altas cargas de bacterias. Aunado a lo anterior, los operadores comentan que después de 30 años de servicio los problemas de salud se agravan ya que empiezan a perder los dientes y con ello, problemas de alimentación.

FICHA TÉCNICA 9		ETAPA: INVENTARIO AMBIENTAL
Medio:	C. Socio-económico	Factor ambiental:
Elemento:	C.1. Población	C.1.3 Prevención de inundaciones

Una inundación es la ocupación por parte de aguas en zonas que habitualmente están libres de ésta debido generalmente a deficiencias en el alcantarillado, por lo que este factor ambiental se altera cuando se realiza el desazolve de las alcantarillas aumentando la capacidad hidráulica y disminuyendo la probabilidad de inundaciones.