



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD
INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES, SOCIALES Y ECONÓMICOS DE
SISTEMAS DE DRENAJE CONVENCIONAL FRENTE A SISTEMAS DE
DRENAJE SOSTENIBLE, CON ENFOQUE DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA**

**TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD**

**PRESENTA
I.A. ELIANA ISABEL TORO HUERTAS**

**TUTOR PRINCIPAL
DRA. LEONOR PATRICIA GÜERECÁ HERNÁNDEZ
INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:
DR. DANIEL JATO ESPINO
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
DR. ITZKUAUHTLI BENEDICTO ZAMORA SAENZ
INSTITUTO BELISARIO DOMÍNGUEZ**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, JULIO 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Coordinación de Estudios de Posgrado
Ciencias de la Sostenibilidad
Oficio: CEP/PCS/821/19
Asunto: Asignación de Jurado

M. en C. Ivonne Ramírez Wence
Directora General de Administración Escolar
Universidad Nacional Autónoma de México
Presente

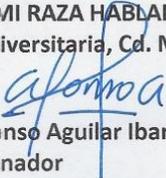
Me permito informar a usted, que el Comité Académico del Programa de Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, en su cuadragésimo séptima sesión del 14 de mayo del 2019, aprobó el jurado para la presentación del examen para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD**, de la alumna **TORO HUERTAS ELIANA ISABEL** con número de cuenta **518492122** con la tesis titulada "Evaluación de impactos ambientales, sociales y económicos de sistemas de drenaje convencional frente a sistemas de drenaje sostenibles, con enfoque de análisis de ciclo de vida", bajo la dirección de la Dra. Leonor Patricia Güereca Hernández.

PRESIDENTE: DR. ALONSO AGUILAR IBARRA
VOCAL: DR. ITZKUAUHTLI BENEDICTO ZAMORA SÁENZ
SECRETARIO: MTRA. ELENA TUDELA RIVADENEYRA
SUPLENTE 1: DR. DANIEL JATO ESPINO
SUPLENTE 2: DRA. LEONOR PATRICIA GÜERECA HERNÁNDEZ

Sin más por el momento me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE,

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, Cd. Mx., 27 de junio de 2019.


Dr. Alonso Aguilar Ibarra
Coordinador
Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, UNAM

DEDICATORIA

A Dios, por guiarme en mi camino, por la vida que me ha dado y por brindarme bendiciones a lo largo de mi vida.

A mis padres y hermana, Miriam Amparo, Jose Eliberto y Monica Patricia, por siempre apoyarme en las decisiones que he tomado en la vida y ser siempre el pilar que me mantiene y me hace seguir adelante. Gracias por ser el mejor ejemplo, por enseñarme desde pequeña que la vida se trata de dar siempre lo mejor, por inculcarme disciplina y constancia. Este logro es por y para ustedes, como fruto de toda una vida de enseñanzas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y al Posgrado de Ciencias de la Sostenibilidad por darme la oportunidad de continuar con mi formación académica.

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca nacional y de movilidad otorgada para la realización de mis estudios de posgrado y estancia de investigación.

Al Programa de apoyo a los estudios de posgrado (PAEP) por la asignación de recursos para la realización de mi estancia de investigación en el grupo GITECO de la Universidad de Cantabria, España.

A la Comisión Estatal de Aguas (CEA) de Querétaro por su apoyo para la obtención de información referente al caso de estudio del presente trabajo.

Agradezco a la Dra. Leonor Patricia Güereca por su confianza y disposición de recibirme en su grupo de trabajo y por el apoyo durante el desarrollo de este proyecto. Me llevo una gran experiencia de haber trabajado junto a usted.

Muchas gracias a mi comité tutor compuesto por el Dr. Daniel Jato Espino y el Dr. Itzkauhtli Zamora Sáenz, por su plena atención y disponibilidad durante la realización de este trabajo. Gracias por compartir su tiempo y conocimientos conmigo.

A mi jurado por sus valiosos comentarios y sugerencias para el mejor desarrollo del documento.

Me gustaría agradecerles a mis compañeros de posgrado e Instituto de Ingeniería, Paola Sepúlveda, Laura Sánchez, Diana Pérez, Daniela Henao, Yeinner Tarazona, Karina Coronado, Maribel García, Cecilia Sosa, Carlos Kegel, Ximena García, Elena Villalba, Dora Ruiz y Xochilt García, entre muchos otros por hacerme más agradable mi estancia en México.

A Jaime Rueda por su amistad incondicional y apoyo durante esta travesía que planeamos, realizamos y terminamos juntos.

Agradezco a mi familia, Miriam Amparo Huertas, José Eliberto Toro y Monica Patricia Toro por estar al pendiente de este importante proyecto para mi formación académica y profesional. Gracias por apoyarme y confiar en mí. Los quiero mucho.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<i>LISTA DE TABLAS</i>	viii
<i>LISTA DE FIGURAS</i>	x
<i>LISTA DE ECUACIONES</i>	xi
<i>LISTADO DE SIGLAS</i>	xii
<i>RESUMEN</i>	xiii
<i>ABSTRACT</i>	xiv
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2 HIPOTESIS	3
2 OBJETIVOS	4
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	4
3 JUSTIFICACIÓN	5
4 MARCO TEÓRICO	6
4.1 SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE PLUVIAL	6
4.1.1 Sistemas Urbanos de Drenaje Convencional	6
4.1.2 Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible	9
4.2 VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL	13
4.2.1 Desarrollos Urbanos Integrales sustentables	14
4.3 OBJETIVOS DEL DESARROLLO SOSTENIBLE	15
4.4 ANÁLISIS CICLO DE VIDA	17
4.4.1 Metodología de Análisis Ciclo de Vida	17
4.4.2 Métodos de evaluación de impactos	20
4.4.3 Fortalezas y debilidades del Análisis Ciclo de Vida	21
4.4.4 Antecedentes de Análisis Ciclo de Vida	22
4.4.5 Antecedentes de Análisis Ciclo de Vida para los Sistemas Urbanos de Drenaje Pluvial.....	26

5	MARCO NORMATIVO	29
6	ÁREA DE ESTUDIO	34
7	METODOLOGÍA	37
7.1	ÁMBITO AMBIENTAL.....	37
7.1.1	Definición de objetivo y alcance del Análisis Ciclo de Vida.....	37
7.1.2	Funciones del sistema.....	38
7.1.3	Unidad Funcional	38
7.1.4	Límites del Análisis Ciclo de Vida.....	38
7.1.5	Desarrollo de inventarios para el Análisis Ciclo de Vida	39
7.1.6	Método para la evaluación del impacto	41
7.1.7	Categorías de impacto ambiental.....	42
7.2	ÁMBITO ECONÓMICO.....	45
7.2.1	Valor presente Neto	45
7.2.2	Límites del Análisis de costos	46
7.3	ÁMBITO SOCIAL.....	46
7.3.1	Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible	47
7.3.2	Matriz de Leopold.....	49
7.3.3	Perspectiva Institucional.....	52
7.3.4	Límites del Análisis social	54
8	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	55
8.1	AMBITO AMBIENTAL.....	55
8.1.1	Inventario de Análisis Ciclo de Vida para sistemas Urbanos de Drenaje pluvial	55
8.1.2	Evaluación del impacto ambiental	57
8.2	AMBITO ECONÓMICO.....	64
8.3	AMBITO SOCIAL.....	69
8.3.1	Relación entre Objetivos de Desarrollo Sostenible y los Sistemas de Urbanos de Drenaje Pluvial.....	70
8.3.2	Matriz de Leopold.....	71

8.3.3	Perspectiva a nivel institucional.....	76
9	CONCLUSIONES	79
10	RECOMENDACIONES	81
10.1	LIMITACIONES	81
10.2	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	81
11	REFERENCIAS	83
12	ANEXOS.....	90
	ANEXO 1. BENEFICIOS DE LOS SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE PLUVIAL.....	90
	ANEXO 2. SISTEMA URBANO DE DRENAJE CONVENCIONAL	91
	ANEXO 3. SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE	99
	ANEXO 4. CONSIDERACIONES DE COSTOS.....	103

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tipos de los Sistemas Urbanos de Drenaje convencional	6
Tabla 2. Criterios de diseños de los Sistemas Urbanos de Drenaje Convencional	8
Tabla 3. Tipos de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible	11
Tabla 4. Criterios de diseño para los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible.....	13
Tabla 5. Objetivos de Desarrollo Sostenible, Agenda 2030.	15
Tabla 6. Debilidades y fortalezas del Análisis Ciclo de Vida	21
Tabla 7. Antecedentes del Análisis Ciclo de Vida	22
Tabla 8. Antecedentes de Análisis Ciclo de Vida en Sistemas Urbanos de Drenaje Pluvial	26
Tabla 9. Normas constitucionales, federales y estatales para los sistemas Urbanos de Drenaje ..	29
Tabla 10. Categorías de impacto para el Análisis Ciclo de Vida	42
Tabla 11. Objetivos del Desarrollo Sostenible alineados a los Sistemas Urbanos de Drenaje Pluvial	47
Tabla 12. Acciones realizadas durante el ciclo de vida de los Sistemas Urbanos de Drenaje	49
Tabla 13. Categorías de impacto social para la matriz de Leopold.....	50
Tabla 14. Calificación de la magnitud e importancia del impacto social en la matriz de Leopold ...	51
Tabla 15. Guion de entrevista semiestructurada.....	53
Tabla 16. Parámetros para el sistema Urbano de Drenaje Convencional.....	55
Tabla 17. Inventario de ciclo de vida para Sistemas Urbanos de Drenaje Convencional.....	56
Tabla 18. Parámetros para el Sistema Urbano de Drenaje Sostenible	56
Tabla 19. Inventario de ciclo de vida para el Sistema Urbano de Drenaje Sostenible.....	57
Tabla 20. Impactos ambientales globales para el Sistema Urbano de Drenaje Convencional frente a los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible	58
Tabla 21. Costos de los Sistemas Urbanos de Drenaje Convencional	64
Tabla 22. Costos de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible	65
Tabla 23. Comparación del Valor Presente Neto de los Sistemas Urbanos de Drenaje Convencional frente a los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible.....	67
Tabla 24. Estrategias para la mejora del Sistema Urbano de Drenaje existente en el Fraccionamiento Rancho Bellavista.....	70
Tabla 25. Objetivos del Desarrollo Sostenible asociados a los Sistemas Urbanos de Drenaje Pluvial	71
Tabla 26. Matriz de Leopold aplicada al Sistema Urbano de Drenaje Convencional	72

Tabla 27. Matriz de Leopold aplicada al Sistemas Urbano de Drenaje Sostenible.....	74
Tabla 28. Beneficios de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en relación con los Sistemas Urbanos de Drenaje Convencional.....	90
Tabla 29. Áreas tributarias para el Sistema Urbano de Drenaje Convencional.....	91
Tabla 30. Coeficiente de escurrimiento para el Sistema Urbano de Drenaje Convencional.....	92
Tabla 31. Isoyetas de intensidad ordenadas de mayor a menor.....	92
Tabla 32. Constantes para el sistema de ecuaciones.....	92
Tabla 33. Calculo hidráulico del Sistema Urbano de Drenaje convencional.....	94
Tabla 34. Características de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible para el fraccionamiento Rancho Bellavista.....	99
Tabla 35. Cálculo de caudales para los Sistemas Urbano de Drenaje Sostenible.....	100
Tabla 36. Área, espesor y volumen para el pavimento permeable.....	100
Tabla 37. Área, espesor y volumen para el área de biorretención.....	100

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema general del diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Convencional.....	7
Figura 2. Tren de gestión en los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible.....	12
Figura 3. Etapas de un Análisis de Ciclo de Vida	18
Figura 4. Relación entre intervenciones y áreas de protección.....	19
Figura 5. Ciudad Santiago de Querétaro	34
Figura 6. Localización del caso de estudio	36
Figura 7. Fotografías del Fraccionamiento Rancho Bellavista, Querétaro	36
Figura 8. Metodología general para la evaluación de impactos ambientales, sociales y económicos	37
Figura 9. Sistema de drenaje urbano pluvial para la construcción del inventario ACV.....	39
Figura 10. Sistema de drenaje pluvial Fraccionamiento Rancho Bellavista	40
Figura 11. Ejemplo de matriz Leopold	52
Figura 12. Contribución a la categoría de cambio climático.....	59
Figura 13. Contribución a la categoría de Agotamiento de la capa de ozono	60
Figura 14. Contribución a la categoría de Acidificación terrestre	61
Figura 15. Contribución a la categoría de Toxicidad humana	62
Figura 16. Contribución a la categoría de Eutrofización de agua dulce	63
Figura 17. Contribución a la categoría de Uso de suelo	64
Figura 18. Comparación de la atribución de los costes en los Sistemas Urbanos de Drenaje	67
Figura 19. Impactos sociales de los sistemas de drenaje convencional	73
Figura 20. Impactos sociales de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible	76

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Factor de equivalencia para la categoría de cambio climático.....	43
Ecuación 2. Factor de equivalencia para la categoría de agotamiento de la capa de ozono	43
Ecuación 3. Factor de equivalencia para la categoría de acidificación terrestre	43
Ecuación 4. Factor de persistencia de eutrofización.....	44
Ecuación 5 Factor de caracterización para la categoría de impacto toxicidad humana	44
Ecuación 6. Factor de caracterización para la categoría de ocupación de suelo	44
Ecuación 7. Valor Presente Neto.....	45
Ecuación 8. intensidad-duración-periodo.....	93
Ecuación 9. Método racional	100

LISTADO DE SIGLAS

ACO	Agotamiento de la capa de ozono
ACV	Análisis de ciclo de vida
ARH	Agotamiento del recurso hídrico
AT	Acidificación terrestre
CC	Cambio climático
CEA	Comisión Estatal de Aguas
CEV	Calidad estética y visual
CONAGUA	Comisión Nacional de Agua
EAD	Eutrofización de agua dulce
GE	Generación de empleo
GSP	Generación de servicios públicos
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
ISO	International Organization for Standardization; Organización Internacional de Estandarización
MC	Modificaciones culturales
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
ODS	Objetivos del desarrollo sostenible
OS	Ocupación del suelo
REA	Recreación y espacios abiertos
SHCP	Secretaría de Hacienda y Crédito Público
SS	Salud y seguridad
SUDS	Sustainable Drainage Systems; Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible
TH	Toxicidad humana
UF	Unidad funcional
UN	United Nations; Naciones Unidas
UNEP	United Nations Environment Programme; Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
VIS	Viviendas de interés social

RESUMEN

El objetivo principal de los sistemas de drenaje urbano es concentrar las aguas de lluvia, evacuando la escorrentía para evitar problemas de inundación y minimizar los impactos en un sistema urbanístico. En México estos sistemas tienen la doble función de recolectar aguas residuales y las pluviales. Un factor importante a considerar es el crecimiento acelerado de las ciudades; debido a que modifican el ciclo hidrológico natural aportando gran cantidad de contaminantes a las corrientes superficiales que reciben el agua lluvia. Actualmente, se distinguen dos sistemas de drenaje urbano: los convencionales como las tuberías o pozos y los sostenibles como las cubiertas verdes o zanjas filtrantes, cada uno con enfoques y características distintas a nivel ambiental, social y económico, que pueden representar impactos y/o beneficios en cuanto a la calidad y cantidad de escorrentías, el desarrollo urbanístico e integración paisajística y los valores sociales y ambientales. En virtud de lo anterior, el presente proyecto busca evaluar los impactos ambientales, sociales y económicos de los sistemas de drenaje urbano convencional y el potencial uso de sistemas de drenaje urbano sostenible en un desarrollo habitacional de viviendas de interés social tomando como caso de estudio la ciudad Santiago de Querétaro en el Estado de Querétaro, mediante un enfoque de ciclo de vida. Para ello se empleó la metodología de Análisis de Ciclo de Vida para evaluar el ámbito ambiental, costos de inversión, operación, mantenimiento y desmantelamiento para conocer la rentabilidad de la infraestructura en el ámbito económico, y una alineación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible con una matriz de Leopold para identificar aspectos sociales. Los resultados mostraron que la implementación del sistema de drenaje convencional en el área de estudio resulta menos costosa en comparación con el sistema de drenaje sostenible, no obstante, la implementación de este último contribuye positivamente en los ámbitos social y ambiental.

Palabras clave: sistemas de drenaje urbano, sistema de drenaje convencional, sistema de drenaje sostenible, viviendas de interés social, análisis ciclo de vida ambiental, impactos sociales, impactos económicos.

ABSTRACT

The main aim of an urban drainage system is rainwater harvesting and evacuating runoff to avoid flooding problems and minimize impacts on an urban system. In México these systems have double function of collecting wastewater and rainwater. On the other hand, the rapid cities growth and environmental degradation have modified the natural hydrological cycle, contributing a large amount of pollutants to the surface streams that receive rainwater. Currently, two urban drainage systems are distinguished conventional and sustainable, each of them with different environmental, social and economic approaches and characteristics, which may represent impacts and / or benefits in terms of quality and quantity of runoff, urban development and landscape integration and social and environmental values. This paper present the life cycle assessment to compere the environmental, economic and social impacts of urban drainage systems in a social interest housing, taking as case study the Santiago de Querétaro city, the methodology used was Life Cycle assessment for environmental scope, the construction, operation, maintenance and decommissioning cost were considered for economic sphere, and Leopold matrix was used to identify the potential social impacts aligned with the Sustainable Development Goals. The results showed that the implementation of the conventional drainage system in the study area is more economical than the sustainable urban drainage system, however, the implementation of the latter system contributes positively in the social and environmental fields.

Keywords: urban drainage systems, conventional drainage system, SUDS, Social interest housing, life cycle assessment, environmental and social and economic impacts.

1 INTRODUCCIÓN

Los daños ocasionados por las lluvias son cada vez mayores debido a la expansión desmedida de las ciudades, lo cual ha disminuido la capacidad de filtración del suelo y ha aumentado los escurrimientos de agua; de modo que ha traído como consecuencia efectos adversos sobre la salud humana y en la infraestructura urbanística. En respuesta a este fenómeno se han implementado sistemas de drenaje capaces de recolectar, encausar y disponer adecuadamente los excesos de aguas pluviales, normalmente mezcladas con aguas residuales (Ore *et al.*, 2007). Los sistemas de drenaje convencional están compuestos por sumideros, cunetas, canales y colectores. Su principal objetivo es evacuar lo antes posible y de manera puntual la escorrentía generada por precipitaciones y las aguas residuales, no permitiendo generalmente el aprovechamiento del recurso pluvial (Charlesworth, 2010). En la actualidad, estos sistemas resultan insuficientes, debido al crecimiento y desarrollo urbano que se viene evidenciando en los últimos años, ocasionando el deterioro del suelo, contaminación hídrica, problemas en la salud pública y deterioro de espacios urbanos.

Ante la necesidad de afrontar estos problemas asociados con los sistemas de drenaje urbano convencional se han venido introduciendo sistemas de aguas de lluvia no convencionales acordes con el desarrollo sostenible, conocidos como sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS por sus siglas en inglés), cuyo objetivo es reproducir de la manera más fiel posible el ciclo hidrológico natural previo a la urbanización (Perales y Doménech, 2008). Los SUDS son considerados como la alternativa más eficaz para tratar el agua de lluvia, debido a su integración de estrategias de control y gestión de escorrentía mediante elementos integrantes de la infraestructura (urbano-hidráulico-paisajística), así como, humedales, zanjas filtrantes, cuencas de biorretención y cubiertas verdes entre otros. Estos sistemas permiten mejorar la calidad de vida, la regulación de microclimas, atenuar eventos de inundación, el enriquecimiento de la biodiversidad, reducción de emisiones de efecto invernadero y el aprovechamiento del agua. No obstante, la implementación de estos sistemas puede generar una serie de inconvenientes al ser relativamente infraestructuras nuevas, tales como: la falta de experiencia en el sector construcción y desconocimiento por parte de los diseñadores que limita su aplicación, la desconfianza que genera frente al sistema de drenaje convencional y la necesidad de un mantenimiento específico para cada tipo de sistema (Sañudo *et al.*, 2012).

La gestión integral del recurso pluvial en espacios urbanos es necesaria para la implementación de sistemas de drenaje urbano eficientes, es por ello que es necesario analizar su sostenibilidad en sus tres componentes fundamentales: medio ambiente, sociedad y economía. En la conferencia de las Naciones Unidas en 2012, se establecen 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en el cual, reconoce que el crecimiento debe ser inclusivo y ambientalmente racional para reducir la pobreza y crear una prosperidad compartida para la población actual y para seguir satisfaciendo las necesidades de las generaciones futuras (Naciones Unidas, 2015). Es por ello que las evaluaciones de sostenibilidad enfocadas a los ODS han permitido la identificación, predicción y análisis de los potenciales impactos, que en sistemas de drenaje proporcionaría un marco para evaluar el desempeño de la infraestructura, de modo que pueda usarse como herramientas de diseño y procesos en la toma de decisiones.

Vale la pena resaltar que para alcanzar el desarrollo sostenible de un lugar se busca satisfacer las necesidades humanas de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras; además de reconocer y comprender las interrelaciones entre la economía, la sociedad y el medio ambiente. Bajo esta premisa, el desarrollo de este trabajo proporciona las ideas y/o conocimiento necesario para hacer operativo el concepto normativo de sostenibilidad y los medios para planificar e implementar los pasos adecuados para este fin, teniendo en cuenta las diferentes perspectivas de distintas disciplinas, filosofías y metodologías con el fin de proporcionar análisis y evaluaciones integradas (Spangenberg, 2011; Kates, *et al.*, 2011).

La evaluación de los impactos ambientales puede llevarse a cabo mediante la metodología de Análisis Ciclo de Vida, que permite determinar todas las cargas ambientales asociadas a la producción de bienes y servicios, desde la obtención de las materias primas hasta su disposición final (ISO, 2006). Para esto, es necesario analizar todos los flujos de entrada y salida en cada uno de los procesos unitarios de la cadena de valor, para determinar los impactos ambientales que se generan.

Con ése mismo enfoque se analizan también los impactos sociales, cuyo objetivo es identificar las afectaciones de un producto o servicio vinculados con la calidad de vida y bienestar de la población considerando todas sus etapas y los actores involucrados, incluyendo trabajadores, consumidores, proveedores y comunidades. La matriz de Leopold es una metodología que permite cuantificar los impactos asociados a cierta actividad y/o acción desarrollada durante un proyecto (Leopold *et al.*, 1971) permitiendo conocer los efectos adversos sobre el medio ambiente y la sociedad; además identificar posibles áreas de mejora.

Por otro lado, las valoraciones económicas generalmente se emplean para en la comparación de los costos netos y posterior comparación con los beneficios que resultan ejecutar cierta acción, considerando cada una de las etapas del ciclo de vida de los sistemas de drenaje urbano en el área de estudio. Este método sirve de herramienta para la toma de decisiones con repercusiones ambientales, donde las autoridades están obligadas a evaluar el impacto potencial que puede tener los sistemas de drenaje urbano que decidan impulsar, ya que fomentan el desarrollo de proyectos que buscan alcanzar los objetivos nacionales de sostenibilidad.

En virtud de lo anterior, el presente proyecto de investigación busca evaluar los impactos que generan los sistemas de drenaje urbano convencional frente a los SUDS con un enfoque de ciclo de vida, en aras de proponer recomendaciones para su implantación en viviendas de interés social en la ciudad Santiago de Querétaro, México. Se consideran este tipo de viviendas debido al aumento de los procesos de expansión territorial que se vienen evidenciando en los últimos años en México, los cuales han sido potencializados por una política pública que oferta viviendas en suelo rural económico (Betancourt, 2017). Además, el desarrollo del proyecto permite sustentar la toma de decisiones en estudios que incluyan el análisis de los impactos generados lo largo de todo el ciclo de vida de los sistemas de drenaje. Con esto, se evitará que las ciudades transfieran los problemas asociados a los sistemas de drenaje de un lugar a otro y de un medio físico a otro.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una de las problemáticas que se evidencian en las ciudades es la gestión de las aguas pluviales, debido a que el rápido desarrollo urbano ha generado la impermeabilización de las ciudades, teniéndose pocas coberturas vegetales que ayuden a filtrar el agua lluvia. Para ello, se han empleado sistemas de drenaje urbano convencional que permiten la captación de escorrentía, especialmente en épocas de precipitación. No obstante, es frecuente observar drenajes sobrepasados en su capacidad por los grandes volúmenes de agua pluvial, en combinación con las aguas residuales; generando inundaciones, encharcamientos en vías y espacio público, afectaciones en la salud humana y altos costes de reparación por daños causados a infraestructuras. Por tanto, se ha evidenciado la necesidad de generar cambios en la manera de gestionar el agua pluvial y residual en el entorno urbano; al mismo tiempo se genera la necesidad de darle usos alternativos al agua de lluvia, tratar el agua residual y aprovecharla, ya que se considera un recurso imprescindible para tener en cuenta dentro de la gestión hídrica.

En respuesta a esta problemática, se proponen soluciones no convencionales acordes con el desarrollo sostenible, los cuales generan bajo impacto a nivel económico, social y ambiental, debido a que buscan mitigar los problemas asociados al drenaje convencional, estos son conocidos como sistemas urbanos de drenaje sostenible. Estos sistemas, buscan el manejo eficiente del agua lluvia, gestionada de forma independiente que la residual y considerándola un recurso aprovechable el cual mejora las prácticas de gestión y garantiza un sistema eficaz y sostenible. Para ello, es necesario realizar una evaluación de los potenciales impactos ambientales, sociales y económicos, que estos sistemas generan para las cuencas y los casos específicos en las que se plantean, considerando las características específicas del sitio. Estas evaluaciones deberán de tener un enfoque holístico que permita identificar potenciales mejoras y favorecer el proceso de toma de decisiones que contribuyan a la sostenibilidad.

Con base en lo anterior se plantea la siguiente pregunta de investigación, ¿Cuáles son los impactos ambientales, sociales y económicos asociados a los sistemas de drenaje urbano convencional frente a los sistemas de drenaje sostenible a lo largo de su ciclo de vida, considerando su implementación en viviendas de interés social de la ciudad Santiago de Querétaro, México?

1.2 HIPOTESIS

- Los sistemas de drenaje urbano sostenible generan menos impactos ambientales, sociales y económicos de los que se generan por los sistemas de drenaje convencional en un caso específico de vivienda de interés social.
- El análisis independiente de la respuesta económica, ambiental y social de los sistemas urbanos de drenaje pluvial permite evaluar su contribución al desarrollo sostenible.
- Se pueden determinar unidades funcionales comparativas para ambos sistemas de drenaje pluvial mediante métodos empíricos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar los impactos ambientales, sociales y económicos de sistemas de drenaje urbano convencional frente a los sistemas de drenaje urbano sostenible, con un enfoque de Análisis Ciclo de Vida y aplicado a un desarrollo habitacional en la ciudad de Santiago de Querétaro, México.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar las características específicas de los sistemas de drenaje urbano convencional y los sistemas de drenaje sostenible tomando como caso de estudio un desarrollo de vivienda de interés social en la ciudad de Santiago de Querétaro.
- Generar los inventarios de ciclo de vida ambiental (ICV), que cuantifiquen todas las entradas y salidas de los sistemas de drenaje urbano convencional y proyectar el ICV para los sistemas de drenaje urbano sostenible diseñados para el caso de estudio de la ciudad de Santiago de Querétaro.
- Identificar impactos sociales asociados a los sistemas de drenaje urbano convencional y sostenible, mediante una matriz de Leopold alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y recopilación bibliográfica.
- Realizar una evaluación económica a partir de costos de construcción, operación, mantenimiento y desmantelamiento de ambos sistemas de drenaje urbano pluvial.

3 JUSTIFICACIÓN

Los procesos de crecimiento urbano con su consiguiente expansión territorial en las ciudades traen consigo una serie de alteraciones ambientales que se agudizan con las temporadas de lluvias y los cambios en las frecuencias e intensidades de las mismas; debido a que se han generado mayores zonas de impermeabilización que modifican los flujos naturales del ciclo hidrológico al reducir los espacios verdes, trayendo como consecuencia mayores volúmenes de escorrentía aumentando el riesgo de inundación. A pesar del esfuerzo de implementar tecnologías de drenaje pluvial, estos sistemas se hacen cada vez más insuficientes ante el aumento de las áreas urbanizadas, ya que generalmente superan las planificadas y por tanto demandan grandes obras de infraestructura, sin mencionar la alteración sobre las fuentes receptoras de los mismos y los problemas ocasionados aguas abajo de los puntos de entrega.

La ciudad de Santiago de Querétaro no ha sido ajena a esta problemática relacionada con la limitación de la capacidad hidráulica del sistema de drenaje urbano pluvial y de los cauces receptores. Esta situación ha condicionado la posibilidad de habilitar y desarrollar nuevos proyectos urbanísticos, que se traducen en grandes obras de infraestructura para la renovación de alcantarillas, colectores, ampliación de paso de vías sobre cauces y la evacuación de aguas lluvias; lo cual ocasiona aumentos considerables en los costos y afectaciones en la salud pública.

Ante este panorama, se evidencia la necesidad de implementar nuevas alternativas como los sistemas de drenaje urbano sostenible que permitan mitigar y minimizar los problemas asociados a la gestión, calidad y cantidad de caudales de escorrentía que se producen en épocas de lluvia. De este modo, se da paso al desarrollo de nuevas áreas urbanizables como el caso de las viviendas de interés social enmarcado en los objetivos del desarrollo sostenible.

Por último, con la implementación de estas propuestas y alternativas, donde se evalúan los impactos ambientales, sociales y económicos generados por estas infraestructuras, se busca crear un cambio en la forma de concebir y planificar los nuevos proyectos urbanísticos de manera sostenible. Además, con el desarrollo de este proyecto se busca justificar la importancia del adecuado manejo de aguas pluviales en áreas de vivienda de interés social ante las autoridades e instituciones competentes y encargadas de la toma de decisiones; siendo este documento, una herramienta base para la gestión del recurso hídrico y prevención del riesgo de inundaciones. Lo anterior, considerando el desempeño de los servicios que proveen los sistemas de drenaje urbano en el marco del desarrollo sostenible.

4 MARCO TEÓRICO

En esta sección se expone la teoría base de la presente investigación, para ello, se inicia con una descripción de los sistemas de drenaje urbano pluvial convencional y sostenible, donde se presentan definiciones, características y componentes de cada uno de ellos. Luego, se analiza de manera general el tema de viviendas de interés social en México y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Por último, se describe la metodología Análisis de Ciclo de vida de acuerdo a la Norma ISO 14040/44 (ISO, 2006) y los antecedentes asociados al mismo.

4.1 SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE PLUVIAL

4.1.1 Sistemas Urbanos de Drenaje Convencional

Los sistemas de drenaje convencional están diseñados para la recepción, canalización y evacuación de las aguas pluviales de la manera más rápida y eficaz posible, de modo que se pueda evitar su retención e infiltración temporal en los suelos que pueden afectar directamente las características funcionales de cualquier elemento integrante del área urbana.

De acuerdo con el libro N° 4 del manual de Agua potable, Alcantarillado y Saneamiento, expedido por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2016) se describen textualmente las siguientes definiciones:

- **Alcantarilla.** *“Conducto subterráneo para conducir agua de lluvia, aguas servidas o una combinación de ellas”.*
- **Alcantarilla pluvial.** *“Conjunto de alcantarillas que transportan aguas de lluvia”.*
- **Drenaje.** *“Medio empleado para retirar del terreno el exceso de agua no utilizable”.*
- **Drenaje Pluvial Urbano.** *“Constituido por una red de conductos e instalaciones complementarias que permiten la operación, mantenimiento y reparación del mismo; su objetivo es la evacuación de las aguas pluviales, que escurren sobre calles y avenidas, evitando con ello su acumulación y propiciando el drenaje de la zona a la que sirven, de ese modo se impide la generación y propagación de enfermedades relacionadas con aguas estancadas”.*

Según sea la función del tipo de aguas que se pretende evacuar y de la disposición geométrica del área en el cual se va a instalar el sistema, se pueden reconocer dos tipos de drenaje no convencional los cuales se explican en la Tabla 1:

Tabla 1. Tipos de los Sistemas Urbanos de Drenaje convencional

SISTEMA DE DRENAJE	DESCRIPCIÓN
Drenaje profundo	Obras destinadas a impedir el acceso del agua a las capas superiores de las vías urbanas, a partir de drenes subterráneos, arquetas y tuberías de desagüe.
Drenaje superficial	Obras destinadas a la recogida, canalización y evacuación de aguas pluviales a los cauces naturales, sistemas de alcantarillado o a la capa freática del terreno. <u>Longitudinal:</u> Canaliza las aguas caídas sobre la plataforma y taludes de explanación de forma paralela a la calzada, mediante cunetas, colectores, sumideros etc.

Tabla 1. (Continuación)

SISTEMA DE DRENAJE	DESCRIPCIÓN
Drenaje superficial	<u>Transversal</u> : Permite el paso del agua a través de los cauces naturales bloqueados por la infraestructura urbana, así como puentes, canales o viaductos.

El diseño y construcción de un sistema de drenaje convencional constituye varias etapas de análisis y evaluación para llevarlo a cabo conforme a las características y especificaciones que dicta la normatividad en México; en este caso CONAGUA (2016), el cual establece un manual para este tipo de sistemas. Para llevar a cabo estos proyectos en VIS es necesario conocer el tipo de desarrollo (habitacional, comercial, industrial, mixto), tablas de áreas de uso del suelo (terreno, vialidad, donaciones, verde), número de lotes, densidad de la población, intensidad de lluvia, coeficiente de escurrimiento, área de la cuenca, gasto del proyecto y tipo de drenaje pluvial.

En la Figura 1 se muestra un esquema general de los componentes que se requieren en el diseño de sistemas de drenaje convencional:

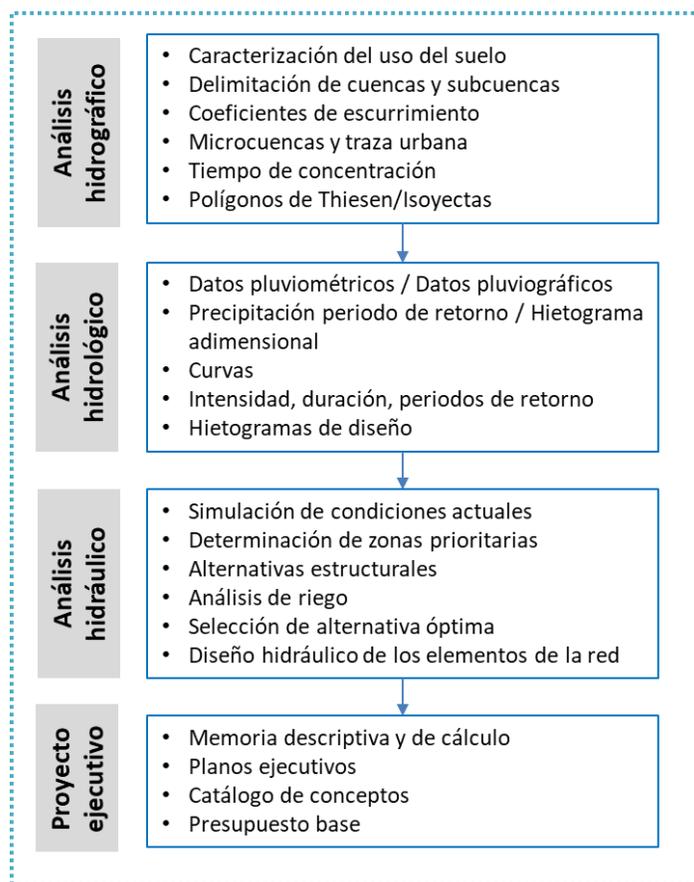


Figura 1. Esquema general del diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Convencional

Fuente: Adaptado de CONAGUA, 2016

De acuerdo con el libro N° 19 del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y saneamiento (CONAGUA, 2016) el sistema de drenaje convencional se encuentra integrado por los siguientes elementos:

- a) **Estructuras de captación:** Recolectan las aguas a transportar mediante sumideros o coladeras, también conocidos como bocas de tormenta. No obstante, pueden existir conexiones domiciliarias donde se vierta el agua que cae en techos o patios.
- b) **Estructuras de conducción:** Transportan las aguas recolectadas por las estructuras de captación hacia sitios de tratamiento, almacenamiento o vertido; para ello, se emplean conductos cerrados o abiertos como tuberías y canales.
- c) **Estructuras de conexión y mantenimiento:** Permiten la conexión y mantenimiento de los conductos que forman la red de drenaje, mediante estructuras conocidas como pozos de visita.
- d) **Estructuras de descarga o vertido:** Protegen y mantienen libre de obstáculos la descarga final del sistema de drenaje.
- e) **Estructuras complementarias:** Aquellas estructuras que en casos específicos forman parte de un sistema de drenaje, para resolver un problema determinado, como, por ejemplo:
 - Estructuras de retención.
 - Estructuras de detención.
 - Estructuras de infiltración e infiltración.
 - Estructuras de limpieza, remoción y medición.
 - Estructuras de cruce.
 - Estructuras de bombeo.
- f) **Disposición final:** La disposición final no se considera una estructura que forme parte del sistema de drenaje, sin embargo, es de vital importancia considerar este elemento previo a la implementación del sistema para evitar posibles daños al medio ambiente y a la población. Por lo general, las aguas se vierten a una corriente natural o se utilizan para el riego de áreas verdes.

El diseño y construcción de un sistema de drenaje convencional es un trabajo de ingeniería donde se busca la eficiencia y la economía; para ello, se abarca en forma general la determinación de la geometría de la red, incluyendo el perfil y trazo en planta, los cálculos de diámetro y pendientes de cada tramo y la magnitud de las caídas necesarias en los pozos (CONAGUA, 2016). En la Tabla 2 se describen los criterios para el diseño del sistema:

Tabla 2. Criterios de diseños de los Sistemas Urbanos de Drenaje Convencional

CRITERIOS	COMPONENTES
Planeación del sistema de drenaje pluvial	<ul style="list-style-type: none"> • Recopilación de información básica. • Definición de cuencas, sub-cuencas y microcuencas Regionalización del sistema. • Definición de las estructuras del sistema. • Definición de estructuras especiales. • Consideración de áreas de retraso. • Definición del desalojo de las aguas. • Ubicación de estructuras de descarga.

Fuente: Adaptado de CONAGUA, 2016

Tabla 2. (Continuación)

CRITERIOS	COMPONENTES
Periodo de retorno de diseño	<ul style="list-style-type: none"> • Asignación del periodo de retorno de diseño. • Periodos de retorno de diseño en sub-cuencas. • Periodo económico de diseño.
Trazado de la red de drenaje	<ul style="list-style-type: none"> • Configuraciones de un sistema de drenaje. • Configuraciones de la red de atarjeas.
Diseño y funcionamiento hidráulico	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones mínimas en el diseño de las conducciones en el drenaje pluvial urbano. • Velocidades permisibles de escurrimiento en colectores y emisores. • Diseño de la red de atarjeas.
Drenajes en calles pavimentadas	<ul style="list-style-type: none"> • Pendiente longitudinal. • Pendiente transversal. • Guarniciones y cunetas.
Diseño de bocas de tormenta	<ul style="list-style-type: none"> • Tipos de boca de tormenta. • Capacidad de entrada. • Dimensiones mínimas recomendadas de las bocas de tormenta. • Ubicación de captaciones o bocas de tormenta. • Diseño de estructuras de regulación.
Optimización de la red drenaje	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño óptimo de la red de drenaje para un determinado periodo de retorno. • Costos por insuficiencia de la red. • Curva de costo total anual. • Costo anual de la red. • Costo de mantenimiento. • Costo esperado de daños. • Selección de la red óptima.

Fuente: Adaptado de CONAGUA, 2016

4.1.2 Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

Los sistemas de drenaje no convencional, también conocidos como Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS), Best Management Practice (BMP), Low Impact Development (LID), Water Sensitive Urban Design (WSUD) y Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (TEDUS) entre otros, son aquellos sistemas que buscan técnicas de gestión de aguas pluviales y planeamiento urbano con el fin de reproducir y/o restituir los procesos hidrológicos previos al desarrollo urbanístico, integrando elementos de control de escorrentía en el paisaje urbano.

De acuerdo con Perales y Doménech (2008) los objetivos de los SUDS incluyen:

- *Preservar la calidad de las aguas receptoras de escorrentías urbanas.*
- *Respetar el régimen hidrológico natural de las cuencas.*
- *Integrar la gestión y el tratamiento de las aguas de lluvia en el paisaje.*
- *Minimizar el coste de las infraestructuras de drenaje al mismo tiempo que aumenta el valor del entorno.*
- *Reducir la demanda de agua potable.*
- *Integrar el tratamiento de las aguas de lluvia en el paisaje.*

- *Proteger la calidad del agua: proteger la calidad de las aguas receptoras de escorrentías urbanas.*
- *Reducir volúmenes de escorrentía y caudales punta.*
- *Incrementar el valor añadido minimizando costes.*

Como parte de las estrategias destinadas a la gestión del recurso hídrico, los SUDS permiten reproducir de la manera más fiel posible los sistemas naturales mediante soluciones rentables y de bajo impacto ambiental y social; en otras palabras, los sistemas de drenaje sostenible apuntan hacia el mantenimiento o la restauración de un régimen hidrológico natural, de modo que se contrarresten los efectos adversos de la urbanización y de los sistemas de drenaje convencional.

Estos sistemas de drenaje, al ser relativamente nuevos y contar con múltiples funciones y características, han dado lugar a diversas clasificaciones según los diferentes estudios que se han llevado a cabo. La clasificación más común y usada es la descrita en manuales de Construction Industry Research and Information Association (CIRIA) y el Centro de Estudios y de Experimentación de obras públicas (CEMEX); en el que se distinguen dos tipos de medidas, estructurales y no estructurales.

a) Medidas no estructurales: Gestionan la escorrentía sin una actuación directa sobre la infraestructura. Tienen la finalidad de concientizar a la población acerca de su papel en la administración del recurso hídrico. Estas medidas se pueden agrupar en (Rodríguez, 2017; Martínez, 2015; Sañudo *et al*, 2012):

- **Legislación.** El desarrollo de políticas públicas que integren aspectos ambientales, sociales y económicos para fomentar la sostenibilidad del agua mediante la regulación, el control preventivo, las sanciones, la información y el planteamiento urbanístico.
- **Educación y formación.** Planes y programas para la participación de los ciudadanos, académicos, y organismos para generar conciencia de las problemáticas y posibles soluciones relacionadas a la gestión del agua.
- **Inversión.** Destinar inversiones económicas de manera eficaz para alcanzar el desarrollo sostenible, mediante la elaboración de manuales y programas para el diseño y construcción de los SUDS.

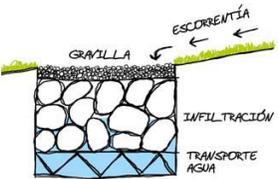
b) Medidas estructurales: Gestionan la escorrentía mediante elementos constructivos o la adopción de criterios urbanísticos. Tienen la finalidad de proporcionar control en la cantidad y calidad del agua pluvial. Estas medidas se pueden agrupar en (Rodríguez, 2017; Martínez, 2015; Sañudo *et al*, 2012):

- **Sistemas de infiltración y control en el origen.** Implican la infiltración del agua de lluvia en el suelo. Para ello, es necesario estudiar las características geotécnicas e hidrogeológicas para conocer el tipo de suelo, la permeabilidad y la situación freática. Ejemplos de estos sistemas son: superficies permeables, cubiertas verdes, zanjas de infiltración, depósitos de infiltración y pavimentos permeables.
- **Sistemas de captación y transporte.** Integran la captación y conducción del agua de lluvia hacia otros sistemas de tratamiento y vertido. Entre ellos están los drenes filtrantes, franjas filtrantes y cunetas verdes.

- **Sistemas de almacenamiento y tratamiento.** Permiten gestionar grandes volúmenes de escorrentía pluvial. Usualmente, se encuentran situados al final de la red de drenaje para alargar la estancia del agua para lograr la depuración y aprovechamiento del recurso antes de su vertido. Como, por ejemplo, depósitos de infiltración, estanques de retención y humedales artificiales.

En la Tabla 3 se describen algunos ejemplos de SUDS.

Tabla 3. Tipos de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

SISTEMA DE DRENAJE	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
Cubiertas vegetales	<i>Sistemas multicapa con cubierta vegetal que recubren tejados y terrazas de todo tipo. Están concebidas para interceptar y retener las aguas pluviales, reduciendo el volumen de escorrentía y atenuando el caudal pico. Además, retienen contaminantes, actúan como capa de aislante térmico en el edificio y ayudan a compensar el efecto “isla de calor” que se produce en las ciudades.</i>	
Superficies permeables	<i>Pavimentos que permiten el paso del agua a su través, abriendo la posibilidad a que ésta se infiltre en el terreno o bien sea captada y retenida en capas sub-superficiales para su posterior reutilización o evacuación. Existen diversas tipologías, entre ellas: césped o gravas, bloques impermeables con juntas permeables, bloques y baldosas porosas, pavimentos continuos porosos.</i>	
Franjas filtrantes	<i>Franjas de suelos vegetados, anchos y con poca pendiente, localizadas entre una superficie dura y el medio receptor de la escorrentía. Propician la sedimentación de las partículas y contaminantes arrastrados por el agua, así como la infiltración y disminución de la escorrentía.</i>	
Depósitos de infiltración	<i>Depresiones del terreno vegetadas diseñadas para almacenar e infiltrar gradualmente la escorrentía generada en superficies contiguas. Se promueve así la transformación de un flujo superficial en subterráneo, consiguiendo adicionalmente la eliminación de contaminantes mediante filtración, adsorción y transformaciones biológicas.</i>	
Drenes filtrantes	<i>Zanjas poco profundas rellenas de material filtrante, con o sin conducto inferior de transporte, concebidas para captar y filtrar la escorrentía de superficies impermeables contiguas con el fin de transportarlas hacia aguas abajo. Además, pueden permitir la infiltración y la laminación de los volúmenes de escorrentía.</i>	
Humedales	<i>Lagunas naturales o superficiales con menor profundidad y con mayor densidad de vegetación emergente, aportan un gran potencial ecológico, estético, educacional y recreativo.</i>	

Fuente: Adaptado de Perales y Doménech, 2008

Tabla 3. (Continuación)

SISTEMA DE DRENAJE	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
Cunetas verdes	Estructuras lineales vegetadas de base ancha (> 0,5 m) y talud tendido (<1V:3H) diseñadas para almacenar y transportar superficialmente la escorrentía. Deben generar bajas velocidades (< 1-2 m/s) que permitan la sedimentación de las partículas para una eliminación eficaz de contaminantes. Adicionalmente pueden permitir la infiltración a capas inferiores.	
Estanques de retención	Lagunas artificiales con lámina permanente de agua con vegetación acuática, tanto emergente como sumergida. Están diseñadas para garantizar largos periodos de retención de la escorrentía, promoviendo la sedimentación y la absorción de nutrientes por parte de la vegetación. Contienen un volumen de almacenamiento adicional para la laminación de los caudales punta.	

Fuente: Adaptado de Perales y Doménech, 2008

Para tratar de reproducir el ciclo hidrológico del área de estudio, es necesario establecer un tren de sistemas para potencializar la gestión del agua pluvial. Para ello, se combinan varias de las técnicas mencionadas en la Tabla 3, considerando la prevención mediante medidas no estructurales, la gestión en el origen (control del agua en la fuente o intermediaciones), la gestión en el entorno urbano a escala local y la gestión en cuencas a una escala regional, como se evidencia en la Figura 2.

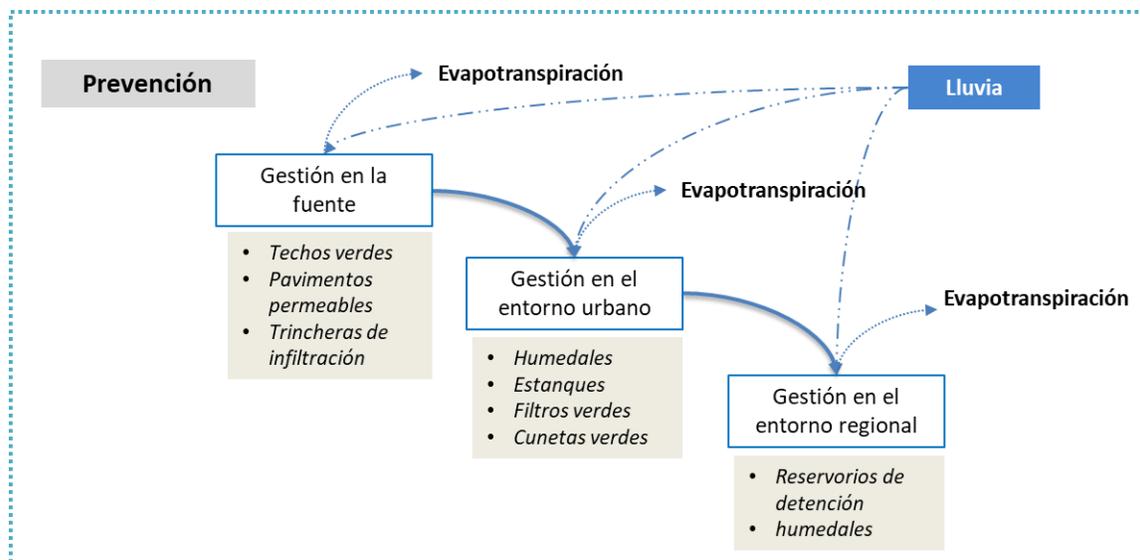


Figura 2. Tren de gestión en los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

Fuente: Adaptado de CIRIA, 2001

La planificación y selección de los tipos de drenaje debe considerar varios elementos de distinta naturaleza como (CEDEX, 2008; US-EPA, 2002):

- El control de la cantidad y calidad del agua que se espera que proporcione la infraestructura.
- El servicio e integración en la comunidad de las técnicas seleccionadas.

- El entorno arquitectónico.
- Los usos del suelo.
- Los usos urbanos.
- La integración paisajística de la infraestructura.
- La potencialidad de generación de hábitats adecuados para la flora.

Como se ha mencionado, la construcción de los SUDS considera las características específicas del área en el que se desea implementar: precipitación, pendientes, geomorfología y uso del suelo entre otras. Para ello, deben existir una serie de objetivos claros que permita fijar los criterios de diseño para una adecuada planificación del tren de drenaje sostenible. En la Tabla 4 se describen algunos de los criterios. Es importante tener en cuenta componentes de cantidad de agua, calidad de agua y servicio ofrecido a la comunidad. Asimismo, estos sistemas deben asegurar una eficiencia depuradora en función de los riesgos de contaminación (Sañudo *et al.*, 2012; US-EPA,2002).

Tabla 4. Criterios de diseño para los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

CRITERIOS	DESCRIPCIÓN	EJEMPLO
Hidráulicos	Ayuda al control de daños agua arriba o abajo relacionados con la cantidad de agua. Además de determinar los volúmenes útiles de almacenamiento.	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizar la escorrentía superficial como recurso. • Apoyar la gestión eficaz del riesgo a inundación. • Proteger la morfología y la ecología del medio receptor. • Drenaje eficaz • Flexibilidad en el diseño del sistema.
Calidad del efluente	Permite la reducción eficaz de los efectos de la contaminación.	<ul style="list-style-type: none"> • Apoyar la gestión de la calidad del agua en medios receptores. • Diseñar la resistencia del sistema para hacer frente a futuros cambios.
Servicio	Contribuye a la estructuración del paisaje urbano para el enriquecimiento de su valor estético y recreativo. También, a la promoción de la salud y bienestar.	<ul style="list-style-type: none"> • Apoyar la educación ambiental. • Maximizar la multi-funcionalidad • Mejorar y maximizar el carácter visual. • Apoyar la capacidad de adaptación del desarrollo de futuros cambios. Más seguros.
Biodiversidad	Crea y/o rehabilita hábitats. Asimismo, Promoción de ambientes saludables que valorizan la vida urbana.	<ul style="list-style-type: none"> • Apoyar y proteger el hábitat natural y las especies. • Contribuir en los objetivos locales de biodiversidad. • Contribuir a la conectividad del hábitat. • Crear ecosistemas diversos y autosostenidos.

Fuente: Adaptado de Rodríguez et al., 2017

4.2 VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL

El crecimiento acelerado de la población ha provocado que la mancha urbana en México se extienda cada vez más rápido sobre el territorio nacional, provocando la construcción de asentamientos no planificados, debido a las limitantes económicas que enfrentan los ciudadanos para adquirir una

vivienda. Ante esta problemática, el Estado viene desarrollando programas de viviendas de interés social (VIS) con el fin de proveer una vivienda digna a un bajo costo para las familias mexicanas (Alderete, 2010, Sánchez, 2008).

El tema de vivienda en México tiene una larga trayectoria y ha ido cambiando conforme a los acontecimientos que el país ha afrontado. Es por ello que se encuentra ligado a un marco jurídico que le da sustento a la política gubernamental, haciendo referencia a dos niveles (Higuera y Rubio, 2011; López y Leal, 2012):

a) Marco constitucional:

- Constitución política de los Estados Unidos Mexicanos.

b) Leyes relativas de vivienda:

- Ley federal de vivienda.
- Ley General de Desarrollo Social.
- Ley general de Asentamientos Humanos.
- Ley de Transparencia y Fomento a la competencia en el crédito Garantizado.
- Ley del Instituto del Fondo Nacional de la vivienda para Trabajadores.
- Ley del Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado.
- Ley Orgánica de Sociedad Hipotecaria Federal.

Por otro lado, el mercado habitacional en México presenta dos grandes grupos de oferentes: el primero, los organismos nacionales de vivienda como INFONAVIT, FOVISSSTE, FONHAPO, SHF y SOFOLES, los cuales ofrecen un financiamiento hacia el sector privado; y el segundo, las organizaciones, individuos, familias y empresas que construyen vivienda. Estos a su vez determinan la demanda habitacional que la constituyen los trabajadores con derecho a recibir un crédito hipotecario o aquellas familias que resuelven por su cuenta propia sus necesidades de vivienda (Betancourt, 2017; López y Leal, 2012).

Algunas de las características más relevantes para el diseño y construcción de una VIS son las necesidades, el presupuesto y la finalidad de los proyectos, debido a que estas influyen directamente en los precios de los predios, la ubicación, la infraestructura y el ingreso económico que perciben las personas a las que están destinadas estas viviendas (Betancourt, 2017, Sánchez, 2008).

4.2.1 Desarrollos Urbanos Integrales sustentables

Ante la necesidad de dotar de viviendas de manera rápida a la población, el déficit de inmuebles y un sistema hipotecario fuertemente consolidado, ha provocado un rápido crecimiento en el sector, impulsado el desarrollo urbano de forma desordenada (SHCP, 2011). Es por ello, que se promovió la creación de un Grupo de Promoción y Evaluación de Proyectos Sustentables (GPEDUIS), con la finalidad de generar políticas públicas para el desarrollo de entornos sustentables, conocidos como Desarrollos Urbanos Integrales Sustentables (DUIS).

Los (DUIS) se definen como áreas de desarrollo integralmente planeados que contribuyen al ordenamiento territorial, promoviendo un desarrollo urbano más ordenado, justo y sustentable (SHCP, 2011; Sánchez, 2008). Estos desarrollos se caracterizan por la provisión eficiente de servicios públicos,

la reducción de los daños al medio ambiente y el diseño integral de viviendas con áreas recreativas y servicios; en otras palabras, los DUIS implican diseñar un área de calidad total, donde se integren los ámbitos cultural, social, ambiental y económico.

Las áreas de desarrollo para la vivienda tienen dos funciones principales:

- a) *“Proyectos de aprovechamiento de suelo intra-urbano, mediante la Redensificación inteligente de las ciudades, enfocado a los medianos y pequeños desarrolladores, gobiernos municipales y estatales.*
- b) *Proyectos de generación de Suelo Servido con infraestructura, desarrolladores de macro lotes, creando nuevos polos de desarrollo bajo el esquema de Nuevas Ciudades y Comunidades, en el que pueden participar desarrolladores inmobiliarios, gobiernos estatales y gobiernos municipales”.*
(SHCP, 2011)

Los potenciales patrocinadores potenciales para los DUIS son los Gobiernos Estatales, los Desarrolladores urbanos y los Desarrolladores de vivienda; cuyas funciones consisten en la planeación y ordenamiento territorial, desarrollo de suelo apto para uso urbano y ofrecimiento de viviendas respectivamente.

4.3 OBJETIVOS DEL DESARROLLO SOSTENIBLE

La implementación de sistemas urbanos de drenaje pluvial responde a la demanda urbana de recuperación de los ciclos hídricos; por lo que en los últimos años se ha comenzado a considerar como una prioridad la búsqueda en la gestión integral del recurso hídrico (Otaño, 2017). Esta gestión se encuentra relacionada a la necesidad de combatir los efectos que la actividad humana ha tenido sobre su entorno y a la conciencia de la búsqueda de un equilibrio social, ambiental y económico, en aras de llegar a la sostenibilidad.

Uno de los mayores logros en el ámbito de la sostenibilidad ha sido la aprobación de la Agenda 2030 y con ello los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) por la Asamblea General de las Naciones Unidas en el 2015, en la cual se establece una visión transformadora hacia la sostenibilidad económica, ambiental y social de los 193 Estados miembros de la organización. Su objetivo es disminuir la pobreza, la desigualdad, la injusticia, la degradación ambiental y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad. En la Tabla 5 se enuncian los 17 ODS para el 2030.

Tabla 5. Objetivos de Desarrollo Sostenible, Agenda 2030.

	OBJETIVO	DESCRIPCIÓN
1.	Fin de la pobreza	<i>Erradicar la pobreza en todas sus formas en todo el mundo.</i>
2.	Hambre cero	<i>Poner fin al hambre, conseguir la seguridad alimentaria y una mejor nutrición, y promover la agricultura sostenible.</i>

Fuente: Adaptado de Naciones Unidas, 2015.

Tabla 5. (Continuación)

OBJETIVO		DESCRIPCIÓN
3.	Salud y bienestar	<i>Garantizar una vida saludable y promover el bienestar para todos para todas las edades.</i>
4.	Educación de calidad	<i>Garantizar una educación de calidad inclusiva y equitativa, y promover las oportunidades de aprendizaje permanente para todos.</i>
5.	Igualdad de género	<i>Alcanzar la igualdad entre los géneros y empoderar a todas las mujeres y niñas.</i>
6.	Agua limpia y saneamiento	<i>Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos.</i>
7.	Energía asequible y no contaminante	<i>Asegurar el acceso a energías asequibles, fiables, sostenibles y modernas para todos.</i>
8.	Trabajo decente y crecimiento económico	<i>Asegurar el acceso a energías asequibles, fiables, sostenibles y modernas para todos.</i>
9.	Industria, innovación e infraestructura	<i>Desarrollar infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible, y fomentar la innovación.</i>
10.	Reducción de las desigualdades	<i>Reducir las desigualdades entre países y dentro de ellos.</i>
11.	Ciudades y comunidades sostenibles	<i>Conseguir que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.</i>
12.	Producción y consumo responsables	<i>Garantizar las pautas de consumo y de producción sostenible.</i>
13.	Acción por el clima	<i>Tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos (tomando nota de los acuerdos adoptados en el foro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático).</i>
14.	Vida submarina	<i>Conservar y utilizar de forma sostenible los océanos, mares y recursos marinos para lograr el desarrollo sostenible.</i>
15.	Vida de ecosistemas terrestres	<i>Proteger, restaurar y promover la utilización sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar de manera sostenible los bosques, combatir la desertificación y detener y revertir la degradación de la tierra, y frenar la pérdida de diversidad biológica.</i>
16.	Paz, justicia e instituciones sólidas	<i>Promover sociedades pacíficas e inclusivas para el desarrollo sostenible, facilitar acceso a la justicia para todos y crear instituciones eficaces, responsables e inclusivas a todos los niveles.</i>
17.	Alianzas para lograr los objetivos	<i>Fortalecer los medios de ejecución y reavivar la alianza mundial para el desarrollo sostenible.</i>

Fuente: Adaptado de Naciones Unidas, 2015.

Dada la complejidad de los ODS, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) determinó cinco áreas esenciales para lograr las cumplir cada una de las metas para el 2030; estas son:

- a) **Personas:** Busca poner fin a la pobreza y el hambre en todas sus formas y dimensiones, además de velar por que todos los seres humanos puedan realizar su potencial en un marco de equidad, dignidad e igualdad (ONU, 2015). En esta área se encuentran los objetivos 1, 2, 3, 4 y 5.
- b) **Planeta:** Su finalidad es proteger el planeta contra la degradación mediante el consumo y la producción sostenible, la gestión sostenible de los recursos naturales y la implementación de

medidas urgentes para hacer frente al cambio climático (ONU, 2015). Los objetivos 6, 12, 13, 14 y 15 hacen parte de esta área.

- c) **Prosperidad:** Intenta velar por que todos los seres humanos puedan disfrutar de una vida próspera y plena, asegurando un progreso económico, social y tecnológico en armonía con la naturaleza (ONU,2015). Los objetivos que integran esta área son 7, 8, 9, 10 y 11.
- d) **Paz:** Promueve sociedades pacíficas, justas e inclusivas que estén libres del temor y la violencia (ONU, 2015). Esta área se encuentra comprendida por el objetivo 16.
- e) **Alianzas y asociaciones:** Impulsa mecanismos de cooperación y alianza mundial para el desarrollo sostenible y cumplimiento de la Agenda 2030, vigilando que dichos recursos estén a beneficio de los más vulnerables (ONU, 2015). El objetivo 17 representa esta área.

Vale la pena resaltar que Los 17 ODS fueron creados de forma abierta y transparente con la participación de los gobiernos nacionales, distintas organizaciones internacionales y la sociedad civil. Su aplicación es universal y pueden participar tantos países desarrollados como en vía de desarrollo.

La aplicación de los ODS en relación con la gestión integral del agua pluvial mediante sistemas urbanos de drenaje debe considerar todos los objetivos para poder alcanzar un equilibrio real. De modo que se considere el comportamiento humano en el área que se quiere intervenir para implementar medidas de sostenibilidad (Otaño, 2017).

4.4 ANÁLISIS CICLO DE VIDA

El ciclo de vida de un producto comienza con la extracción de materias primas y generación de energía, los cuales se convierten en procesos de manufactura, transporte, uso del producto y posterior reciclaje, reúso o desecho. La adopción del enfoque de ciclo de vida ha permitido reconocer la manera en que las elecciones y acciones humanas influyen en cada etapa del proceso y así, considerar tanto las oportunidades como los riesgos del producto (UNEP, 2004). Para ello, se han desarrollado estrategias a través de acuerdos y normativas internacionales que permitan sistemas de producción eficientes con el medio ambiente y la comunidad, entre estas metodologías surge el Análisis Ciclo de Vida (ACV), el cual se encarga de evaluar los impactos asociados a la generación de un producto, con respaldo científico, considerando todas las etapas del ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final (Güereca, 2006; Sanes, 2012).

4.4.1 Metodología de Análisis Ciclo de Vida

De acuerdo con la Organización Internacional de Estandarización (ISO por sus siglas en inglés), el ACV es una metodología para determinar los efectos asociados a un producto o servicio, compilando un inventario de entradas y salidas relevantes del sistema, evaluando su potencial impacto e interpretando los resultados del análisis con los objetivos del estudio planteado. En la Norma ISO 14040/44, se reconocen cuatro etapas descritas a continuación (Ver Figura 3) (ISO, 2006):

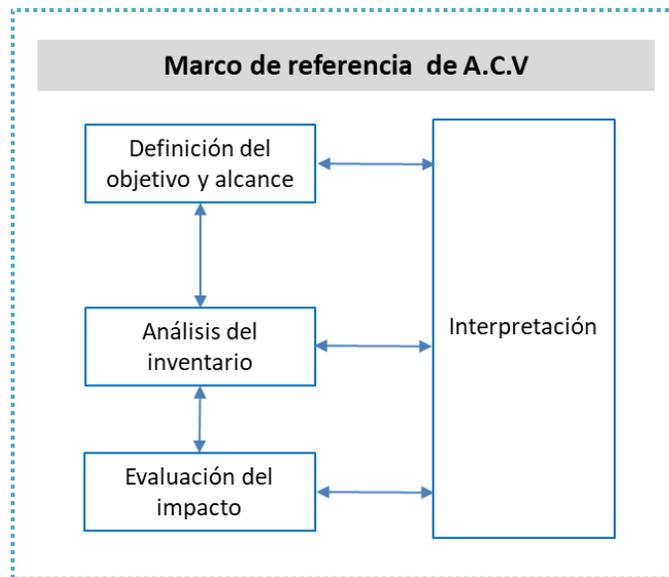


Figura 3. Etapas de un Análisis de Ciclo de Vida
Fuente: Adaptado de ISO, 2006

I. Definición del objetivo y alcance:

Estable el propósito del análisis, el rumbo y la extensión del mismo; para ello, se consideran los sistemas estudiados como los productos o servicios a analizar, la unidad funcional y los límites del sistema (ISO, 2006).

a) Los sistemas estudiados: Productos o servicios que se analizarán y compararán.

b) La unidad funcional (UF): Elemento clave del estudio, debe ser precisa y suficientemente comparable para ser utilizada como referencia. Para ello, se debe describir el flujo de referencia, que es la cantidad de productos o servicios necesarios para cumplir el objetivo del estudio en función de los bienes que se comparan y a partir de esto cuantificar las entradas y salidas de cada sistema.

c) Los límites del sistema: Se debe determinar claramente qué unidades de procesos se incluirán en el estudio, con base en el objetivo establecido. En virtud de que el ACV es un estudio holístico, puede resultar muy extenso y complicado de llevar a cabo, es por esto, que los límites del sistema deben ser claros y precisos, identificando qué procesos unitarios se deberán incluir (Güereca, 2006; ISO, 2006).

II. Análisis del inventario del ciclo de vida:

Comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas relevantes de un sistema, tomando como referencia la unidad funcional. Esas entradas y salidas pueden incluir el uso de recursos y las emisiones al aire, agua y suelo asociadas con el sistema a lo largo del ciclo de vida, es decir, desde la extracción de las materias primas hasta la disposición final (ISO, 2006).

III. Evaluación del impacto del ciclo de vida:

Evalúa cuan significativos son los impactos ambientales potenciales a partir de los resultados obtenidos en el inventario de ciclo de vida desarrollado en la etapa anterior; para ello se realiza una asociación de los datos con las categorías de impactos ambientales, sociales y económicos (ISO, 2006).

La selección de las categorías de impacto debe responder a las necesidades del estudio que se quiere realizar; estos impactos se encuentran asociados a las diferentes intervenciones realizadas por el ser humano llamados también mecanismos ambientales. La norma ISO 14040 establece que los factores de caracterización (representación numérica de los impactos) deben estar enfocados en los mecanismos con alguna de las tres áreas de protección: salud humana, degradación de los recursos y calidad de los ecosistemas. Las áreas de protección hacen referencia a los impactos finales que pueden causarse en el ciclo de vida (Ver figura 4).

Las categorías de punto medio hacen referencia a aquellos impactos generados de manera directa por un mecanismo ambiental, sin tener en cuenta los daños que estos puedan ocasionar a la salud humana o a los ecosistemas; si por el contrario se consideran las repercusiones se les denomina de punto final (Goedkoop *et al.*, 2013).

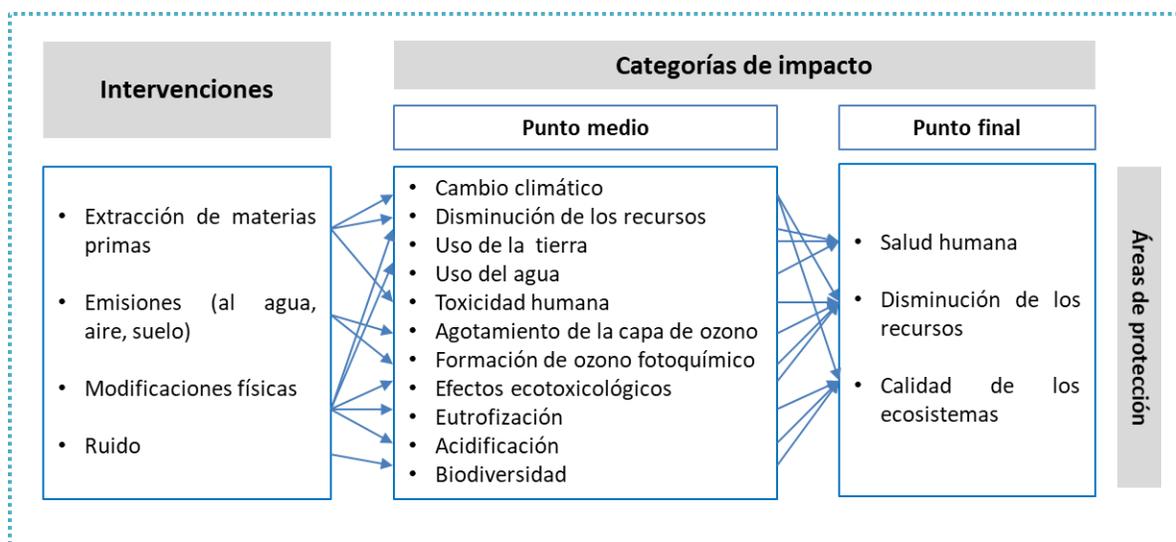


Figura 4. Relación entre intervenciones y áreas de protección

Fuente: Adaptado de UNEP (2014)

Por otro lado, esta etapa de evaluación contiene elementos obligatorios y opcionales de acuerdo con la ISO 14042:

a) **Elementos Obligatorios:**

- Selección: Elección de categorías de impacto y métodos de caracterización.
- Clasificación: Asignación de los datos del inventario a las categorías de impacto.
- Caracterización: Cálculo del indicador de impacto para cada una de las categorías. (ISO, 2006)

b) Elementos Opcionales:

- Normalización: Cálculo de la magnitud del indicador de impacto, usando información de referencia previamente caracterizada.
- Agrupación: Proceso de clasificar por grupos de impacto similar o por jerarquías en una categoría determinada.
- Valoración: Se establecen factores que otorgan una importancia relativa a las distintas categorías de impacto para después sumarlas y obtener un resultado ponderado en la forma de un índice ambiental global para el sistema.
(ISO, 2006)

IV. Interpretación del ciclo de vida:

Identifica, califica, verifica, evalúa y presenta de manera sistemática las conclusiones basadas en los hallazgos del Análisis Ciclo de Vida, con el fin de cumplir los requisitos de aplicación como se describe en el objetivo y alcance del proyecto. Además, se establece disposiciones para los vínculos entre un Análisis Ciclo de Vida y otras técnicas de gestión ambiental (ISO, 2006).

4.4.2 Métodos de evaluación de impactos

Con la implementación de las ISO 14040/44 surgieron de manera paralela proyectos enfocados en el desarrollo de métodos para la evaluación de los impactos asociados durante el ciclo de vida. Algunas de ellos son:

- EDIP (Wenzel *et al.*, 1997)
- CML 2002 (Guinée *et al.*, 2002)
- Ecoindicator 99 (M. Goedkoop y Spriensma, 2000)
- EDIP2003 (M. Hauschild y Potting, 2005)
- EPS (Steen, 1999)
- IMPACT2002+ (Jolliet *et al.*, 2003)
- TRACI (Bare *et al.*, 2003)
- LIME (Itsubo *et al.*, 2004)
- LUCAS (Toffotetto *et al.*, 2006)
- ReCiPe (Goedkoop *et al.*, 2013)

La principal diferencia entre los diferentes métodos reside en la opción de analizar los impactos de punto medio o punto final, cada uno de ellos integra diferentes categorías en función de los resultados que se pretendan obtener. Las categorías de impactos intermedios permiten generar modelos de cálculo que se ajustan a los diferentes intervenciones o mecanismos ambientales, proporcionando información detallada en cada una de las etapas del ACV (Heijungs *et al.*, 2003, Lenzen, 2006). Las categorías de impactos finales consideran los daños directos sobre el medio ambiente y la sociedad, resultando más relevante a una escala global, proporcionando resultados con un nivel de incertidumbre interpretativa más bajo que el enfoque de punto medio, no obstante, el método para cuantificar estos efectos no se encuentra plenamente elaborada (Heijungs *et al.*, 2003).

4.4.3 Fortalezas y debilidades del Análisis Ciclo de Vida

Hoy en día, se realizan estudios de ACV en muchos países, debido a que es una herramienta de apoyo para los tomadores de decisiones. Como cualquier metodología de evaluación de impactos ambientales, tiene ventajas y desventajas, las cuales se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Debilidades y fortalezas del Análisis Ciclo de Vida

	CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
FORTALEZAS	Es una evaluación exhaustiva	ACV es una herramienta analítica que identifica los impactos ambientales totales en todas las etapas de ciclo de vida asociadas con un producto, proceso o actividad humana. Es un enfoque único ya que, sin la perspectiva de ciclo de vida, se arriesga a enfocarse en problemas ambientales que demandan atención inmediata, ignorando o devaluando impactos que pueden ocurrir ya sea en otro lugar o de otra forma.
	Fomenta la comunicación y el discurso	Aunque originalmente fue desarrollado para proveer de información ambiental para distinguir entre productos, ha evolucionado como una base para comunicar el desempeño ambiental de productos y procesos a todos los interesados. Un ejemplo de esto es el desarrollo de Declaraciones Ambientales basadas en ACV.
	Proporciona una estructura para la investigación	Gracias a los estándares de ISO, se tiene una definición de ACV junto con un marco general para realizar un estudio mediante la interrelación de las cuatro etapas.
	Proporciona una estructura para la investigación	Gracias a los estándares de ISO, se tiene una definición de ACV junto con un marco general para realizar un estudio mediante la interrelación de las cuatro etapas.
	Desafía el conocimiento popular	El aspecto más importante de ACV es que ayuda a las personas a incorporar a todo el sistema en la evaluación de impactos. Al alejarse de la manera desconectada de evaluar impactos al final del proceso, ACV puede proporcionar datos e información que hace cuestionarnos qué es preferible ambientalmente.
	Avanza en la base de conocimientos	El reto es encontrar una manera alcanzable y eficiente de compartir este conocimiento con usuarios en todo el mundo.
LIMITACIONES	Coincidir el objetivo y el alcance del proyecto	Con un objetivo claro es más fácil de definir el alcance del estudio y la recolección de información. Además, es necesario que tanto la unidad funcional como el flujo de referencia queden claramente establecidos y diferenciados.
	Reunir información para el inventario puede consumir muchos recursos y tiempo	La información puede ser creada recolectando datos directamente del fabricante. También es común recolectar la información de fuentes como reportes, publicaciones y bases de datos (en este caso, el usuario debe confiar en la reputación del vendedor en cuanto a la calidad de datos y métodos de recolección). Sin embargo, sigue siendo complejo encontrar información que sea equiparable a las condiciones particulares de cada región.
	Tratar con incertidumbre	El análisis de incertidumbre ayuda a determinar la variabilidad de los datos y su impacto en los resultados finales. Se aplica tanto a los datos del inventario como a la evaluación de impactos. Requieren personal especializado lo que limita su empleo.
	Los resultados deben complementarse con otras herramientas para la toma de decisiones	Un estudio de ACV genera información muy útil, pero sus resultados deben ser usados como un componente del proceso de toma de decisiones. Algunas herramientas o métodos que sirven de apoyo son el análisis de riesgos o la evaluación de costos, entre otros.

Fuente: Adaptado de Curran, 2014

Tabla 6. (Continuación)

CARACTERÍSTICA		DESCRIPCIÓN
LIMITACIONES	No siempre se declara a un “ganador”	Convertir impactos a una calificación final es un proceso subjetivo que requiere juicios de valor. La etapa de interpretación de ACV ayuda en el proceso de toma de decisiones, más que seleccionar una preferencia por un producto. En algunos casos, puede que no sea posible establecer que una alternativa es mejor que otra debido a la incertidumbre de los resultados finales, sin que esto signifique que el análisis no contribuye a la toma de decisiones.

Fuente: Adaptado de Curran, 2014

4.4.4 Antecedentes de Análisis Ciclo de Vida

El ACV es una herramienta muy útil que permite la evaluación de los impactos generados por un producto y/o servicio. Esta metodología tuvo un primer acercamiento dentro de la comunidad científica e institucional en el año de 1969 como se evidencia en la Tabla 7 con la empresa de Coca-Cola Company. A partir de este estudio, se dio paso a nuevas investigaciones que han permitido el desarrollo de técnicas y guías para una aplicación más estandarizada de la metodología. Conforme a lo anterior, en la Tabla 7 se muestra la evolución que ha tenido el ACV desde sus inicios hasta el presente año.

Tabla 7. Antecedentes del Análisis Ciclo de Vida

DÉCADA	AÑO	EVENTO	
1960	1969	Estudio para Coca-Cola Co. Sobre los impactos ambientales y consumo de energía de varios tipos de envases.	
	1970	En Suecia, Tetra Pak encarga un estudio de ACV de envases plásticos.	
	1971	La Universidad de Illinois y la Universidad de Stanford realizan estudios de ACV de botellas para bebidas.	
	1971	Se publica el libro Design for Real World: Human Ecology and social Change, escrito por P. Pananek.	
	1972	Informe, Los Limites del Crecimiento.	
	1972	Publicación del documento: <i>A Blueprint for survival</i> .	
	1972	Conferencia de las Naciones Unidas sobre Ambiente Humano.	
	1972	USEPA encarga a MRI estudio de ACV de envases de bebidas	
	1970	1972	En el Reino Unido, se desarrolla el primer protocolo para el ACV en Alemania.
		1973	En Suiza, se realiza el primer Eco balance en la empresa Rocco Conserves.
1975		Se funda la firma Franklin Associates pionera estudios de ACV	
1976		Publicación del resumen de estudio de Coca - Cola Co. En Science Magazine	
1976		USEPA publica Resource and Environmental profile analysis of nine beverage container alternatives	
1976		US Federal Energía Agency pone a disposición del público bases de datos y la metodología REPA	
1977		Publicación parcial del estudio de ACV de Good Year Tire y Rubber Co.	
1979		Se funda Society Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC).	

Fuente: Adaptado de Güereca, 2006; Betancourt, 2017

Tabla 7. (Continuación)

DÉCADA	AÑO	EVENTO
1980	1980	Informe del Estudio de ACV de Solar Energy Research Institute, USA.
	1985	Expedición de la Directiva 85/339 de la comunidad Europea sobre envases de alimentos líquidos que incorpora el pensamiento de ACV
	1985	Suecia, se elabora el estudio: Resource and environmental impact of Tetra Bk carton and refillable and non-refillable glass bottles. Tetra Brik Aseptik Environmental Profile.
	1985	Alemania, se presenta el estudio: Comparative energy and environmental impacts of 21 PET and refillable glass bottles used for soft drink delivery in Germany.
	1987	Informe de la Comisión Brundtland titulado: <i>Nuestro futuro común</i> .
1990	1990	En USA, Franklin Associates elabora el estudio de ACV de pañales desechables y no desechables.
	1990	En Suecia se llevan a cabo dos proyectos sobre ACV para ver las implicaciones de aplicar esta herramienta en la industria sueca.
	1990	En Japón se crea centro de ACV.
	1990	En China se adopta ISO 14040 como norma nacional.
	1990	En Argentina se lleva a cabo una encuesta sobre ACV.
	1990	Primer Taller de la SETAC Norteamérica sobre ACV.
	1991	SETAC realiza cinco talleres sobre ACV en Estados Unidos, Holanda y Portugal.
	1990	Primer Taller de la SETAC Norteamérica sobre ACV.
	1991	SETAC realiza cinco talleres sobre ACV en Estados Unidos, Holanda y Portugal.
	1991	El Concejo Nórdico de Ministros inicia el programa de ACV.
	1991	En Canadá la empresa Alcan Aluminium participa en un estudio de ACV.
	1991	En Canadá, los fabricantes de pláticas y de acero participan en proyectos ACV.
	1991	Se expiden en Japón regulaciones sobre reciclaje.
	1992	El Centro de Eco-vida realiza un estudio de ACV de varios productos.
	1992	En USA se elabora el informe: Tellus Packaging Study: Inventory of material and energy use and air and water emissions from the production of Packaging materials.
	1992	Se crea la Society for the promotion of LCA development - SPOLD.
	1992	En Estados Unidos Franklin Associates publica un artículo en el que se explica la metodología de ACV.
	1993	USEPA publica una guía para la etapa de inventario.
	1993	USEPA crea el Programa de Compras Verdes.
	1993	Publica en Europa de <i>LCA Sourcebook</i> , de SPOLD.
1993	SETAC publica SETAC guidelines for LCA: a code of practice.	
1993	Japón la agencia para las ciencias y la tecnología inicia el <i>Proyecto de Investigación de Ecomateriales</i> .	
1994	En Canadá se publican las primeras normas nacionales de ACV.	

Fuente: Adaptado de Güereca, 2006; Betancourt, 2017

Tabla 7. (Continuación)

DÉCADA	AÑO	EVENTO
1990	1995	Lanzamiento del proyecto <i>Winning Acceptance</i> por parte de SPOLD.
	1995 - 2000	En Canadá se publica Ecocycle.
	1995	En Canadá se publica Life Cycle Management: a guide for better business decisions.
	1995	En los países nórdico se publica: The Nordic guidelines for LCA.
	1995	Nace la publicación periódica científica sobre ACV International <i>Journal of Life Cycle Assessment</i> .
	1995	Se crea la Sociedad Japonesa de ACV.
	1996	Primer número de International Journal of Life Cycle Assessment.
	1997	Publicación de la primera norma internacional sobre ACV, ISO 14040.
	1997	En Canadá se publica Life Cycle management in Canada.
	1997	En Bélgica se lleva a cabo un proyecto de demostración sobre eco diseño.
	1997	En Bélgica se desarrolla el primer software para estudios de ACV llamado Ecoscan.
	1997	Se funda la sociedad Coreana para la Evaluación del Ciclo de Vida.
	1997	En Brasil, primera publicación de ACV: <i>Herramientas de gestión ambiental ISO 14040</i> , de José Ribamar Chenebe.
	1997	En Colombia se crean los comités técnicos del ICONTEC para la homologación a normas nacionales de las normas internacionales.
	1998	En Japón se inicia el proyecto nacional de ACV.
	1998	En Italia se publica la primera guía sobre ACV titulada Manual de operación del ACV, del profesor Vanni Badino.
	1998	En Japón, el Ministro de Agricultura, Bosque y Pesca inicia un proyecto de ACV.
	1998	Se lleva a cabo un estudio de ACV para ver el grado de aplicación de esta herramienta en empresas de Alemania, Italia, Suiza y Suecia.
	1998	En Brasil, nace el comité brasileño de Gestión ambiental que apoyo el desarrollo de la serie ISO 14040.
	1998	En Colombia se dictan curso de ACV, por la Universidad de los Andes.
1999	En Italia se crea la sociedad italiana para el ACV	
1999	Se contempla la política integrada al producto en el Consejo Europeo reunido en Weimar.	
2000	2000	Se incrementa en el mundo la elaboración de ACV.
	2000	En Suiza se funda el Centro Suizo para Inventarios de Ciclo de Vida, el cual desarrollo la base de datos europea Ecoinvent.
	2001	En Estados Unidos se funda el Centro Americano para la Evaluación de Ciclo de Vida.
	2001	En Europa se publican dos grandes estudios sobre el estado del arte del diseño de productos sostenibles
	2001	En Tailandia, se crea la red Tailandesa de ACV.
	2001	La Comisión Europea presenta el Libro Verde sobre Política Integral al Producto.
	2002	Se lanza oficialmente la iniciativa de Ciclo de Vida de UNEP - SETAC.

Fuente: Adaptado de Güereca, 2006; Betancourt, 2017

Tabla 7. (Continuación)

DÉCADA	AÑO	EVENTO
	2002	Se lanza oficialmente la iniciativa de Ciclo de Vida de UNEP - SETAC.
	2002	En Brasil se funda la asociación Brasileña de Ciclo de Vida (ABCV)
	2003	En Canadá, se realiza el primer foro canadiense de ACV
	2003	En Suecia, CPM elabora el proyecto de ACV en el sector forestal.
	2004	En Brasil, ABCV inicia el proyecto brasileño de ACV
	2005	En Colombia se imparte un curso de ACV, impartido por la Universidad de Chalmers, Suecia.
	2006	La empresa Toyota realiza un ACV del nuevo Toyota Camry.
	2006	Se publica la nueva serie de normas ISO 14040/14044
	2011	CILCA 2011, Coatzacoalcos, México/ Sostenibilidad corporativa
	2013	Se realiza el latinoamericano de ACV en Argentina.
	2014	Se realiza el congreso de la SETAC en Suiza.
	2015	CILCA 2015, ACV: Herramienta para la innovación en Latinoamérica.
	2016	Strong Life Cycle Initiative EcoBalance Kioto, Japón
2010	2016	Virtual trainer: Introduction to Sustainable Consumption and Production in Asia. October 2016.
	2017	Brazilian Experts Gear Up for Life Cycle Assessment Forum, March 2017
	2017	Hotspot Analysis methodological framework and guidance, April 2017.
	2017	SETAC Europe 27th Annual Meeting, May 2017.
	2017	CILCA 2017, June 2017.

Fuente: Adaptado de Güereca, 2006; Betancourt, 2017

4.4.5 Antecedentes de Análisis Ciclo de Vida para los Sistemas Urbanos de Drenaje Pluvial

La Tabla 8 presenta un compendio de los trabajos de Análisis Ciclo de Vida para sistemas de drenaje urbano.

Tabla 8. Antecedentes de Análisis Ciclo de Vida en Sistemas Urbanos de Drenaje Pluvial

REFERENCIA	OBJETIVOS	METODOLOGIA	RESULTADOS	CONCLUSIONES
Wang, Ranran, Eckelman, Matthew J. y Zimmerman, Julie (2013) Consequential Environmental and Economic Life Cycle Assessment of Green and Gray Stormwater Infrastructures for Combined Sewer Systems. <i>Environmental Science Technology</i> , 2013, 47 (19), pp 11189–11198	Evaluar sistemas de drenaje urbano en Estados Unidos.	ACV en las etapas de extracción de materias primas, construcción, instalación, mantenimiento y almacenamiento/tratamiento de escorrentía. Análisis costo-beneficio. Análisis de sensibilidad. Software: SimaPro 7.3.	Evaluación de tres alternativas: 1. Gris (<i>sistema de alcantarillado</i>). 2. Verde (<i>cubierta verde, Pavimento permeable, cuenca de biorretención</i>). 3. combinado	Vale la pena considerar factores como la intensidad, precipitación, impermeabilidad de la tierra y la esperanza de vida la infraestructura, ya que se pueden variar las condiciones locales y características de la infraestructura para evaluar los costos y beneficios del manejo de agua pluvial.
Changqing Xu, Jinglan Hong, Haifeng Jia, Shidong Liang, Te Xu. (2017). Life cycle environmental and economic assessment of a LID-BMP treatment train system: A case study in China.	Evaluar los impactos ambientales y económicos de un sistema de tren de tratamiento de SUDS en China.	ACV ambiental y el LCC para evaluar los impactos asociados al ámbito económico. Software: SimaPro 8.2	Las cargas económicas del tren de SUDS están directamente relacionadas con cada una de las técnicas empleadas y los materiales asociados a ellos. Asimismo, la evaluación de la fase de construcción ocasiona mayores cargas ambientales por el uso de energía y transporte.	El uso de información y desarrollo de este tipo de proyectos permite observar el potencial que tienen los SUDS para disminuir las cargas ambientales. Además de contribuir en procesos de toma de decisiones para la implementación de estos sistemas. No obstante, aún se tienen limitaciones asociadas con la disponibilidad de datos y la combinación de factores sociales, de gestión, paisajísticos y políticos.

Tabla 8. (Continuación)

REFERENCIA	OBJETIVOS	METODOLOGIA	RESULTADOS	CONCLUSIONES
Vineyard, Donald; Ingwersen, Wesley W.; Hawkins, Troy R.; Xue, Xiaobo Demeke y Bayou Shuster, William. (2015). Comparing Green and Grey Infrastructure Using Life Cycle Cost and Environmental Impact: A Rain Garden Case Study in Cincinnati, OH.	Comparar sistemas de drenaje urbano convencional frente a los SUDS, a nivel ambiental y económico.	ACV económico en las etapas de producción de materias primas, transporte, construcción, explotación/mantenimiento y clausura/eliminación. Software: OpenLCA	La infraestructura verde muestra resultados más favorables en comparación que la gris; debido a que se reducen drásticamente los impactos ambientales. Los impactos asociados al sistema convencional están determinados en gran medida por la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales.	Sugieren que los costos e impactos están determinados por el requisito de mano de obra; los impactos de la alternativa tradicional están determinados en gran medida por la eficiencia del tratamiento de aguas residuales, mientras que los costos se determinan a expensas de la construcción del túnel.
Anna Petit Boix. (2017). Towards sustainable cities through an environmental, economic and eco-efficiency analysis of urban sanitation and drainage systems.	Evaluar componentes ambientales y económicos de sistemas de drenaje en pequeñas y medianas ciudades.	ACV, el análisis de costes del ciclo de vida (ACCV) y la ecoeficiencia a los sistemas de saneamiento y drenaje urbano. Considerando los materiales empleados para la construcción de estos sistemas Software: SimaPro 8.0	Los impactos ambientales de la construcción de alcantarillado dependen en gran medida de los materiales de la tubería, los diseños de las zanjas y las perturbaciones externas. La forma urbana y la topografía son los principales factores que influyen en el funcionamiento de las alcantarillas, así como otras variables como el clima. La ecoeficiencia de las alcantarillas depende de los impactos operacionales y los costos de instalación.	Este estudio permite determinar si las tendencias observadas en el alcantarillado de ciudades medianas también tienen lugar en grandes ciudades, donde la complejidad urbana es mayor. Por otro lado, el debate de la centralización en zonas periurbanas presenta más retos de futuro.

Tabla 8. (Continuación)

REFERENCIA	OBJETIVOS	METODOLOGIA	RESULTADOS	CONCLUSIONES
Flynn, K y Traver, R. (2013). Green infrastructure life cycle assessment: A bio-infiltration case study. Ecological Engineering (5) pp. 9-22.	Evaluar los impactos ambientales de un jardín de lluvia (SUDS) en la Universidad de Villanova, Estados Unidos.	ACV ambiental para evaluar los impactos asociados a la construcción, operación y desmantelamiento del sistema. Software: SimaPro 7.2	La etapa de construcción presenta mayor impacto en todo el ciclo de vida del jardín de lluvia. No obstante, la etapa de operación es la que evita la gran mayoría de los impactos negativos en todo el ciclo de vida. Vale la pena mencionar, que este tipo de infraestructuras proveen de beneficios ambientales.	La evaluación de los impactos ambientales mediante el ACV es una herramienta poderosa para la planificación sostenible y restaurativa y diseño de infraestructura verde.
Fisher-Jeffes, Lloyd y Armitage, Neil. (2011) A simple economic model for the comparison of SUDS and conventional drainage systems in South Africa. <i>Conference paper on Urban Drainage</i>	Comparar los sistemas de drenaje urbano convencional frente a los sistemas de drenaje urbano sostenible en Sudáfrica considerando términos económicos.	ACV junto con un modelo económico simple (SEM).	Tres etapas: <u>Ciclo de vida</u> , evacuación de costos: (a) capital (<i>diseño, construcción</i>) y (b) operación y mantenimiento. <u>Evaluación ambiental</u> : (a) aspectos no monetarios y (b) bienes y servicios ambientales. Considerando: costos de prevención de daño (<i>gestión de cantidad y calidad del agua</i>) y beneficios de amenidad (<i>valoración de la tierra, oportunidades recreativas</i>). <u>Comparación de sistemas de drenaje</u> .	Es importante considerar el impacto de externalización de la contaminación en aguas pluviales de los SUDS. Considerar la distorsión en la relación beneficio/costo. Tener en cuenta la recarga subterránea, la gestión de cantidad y calidad de agua.

5 MARCO NORMATIVO

El marco legal de los sistemas de drenaje urbano en México está contenido en un conjunto de normas, leyes, planes y programas provenientes de las diferentes dependencias y entidades que conforman el gobierno del país. En la Tabla 9 se evidencia una amplia gama de normas, leyes o programas referentes a la gestión del recurso hídrico en el Estado de Querétaro que propone el aprovechamiento y uso adecuado del agua garantizando su acceso a la población; además de resaltar las obligaciones y/o funciones de los distintos entes y organismos encargados de la prestación de servicios en términos de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas; no obstante, los objetivos de cada una de estas normas o programas abordan el concepto de forma muy general sin abordar los pormenores de cada una de las aplicaciones y elementos que contribuyen al cumplimiento de estas.

Tabla 9. Normas constitucionales, federales y estatales para los sistemas Urbanos de Drenaje

TITULO	ORGANISMO	FECHA	NORMA	OBJETIVO
Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos	Cámara de Diputados del Honorable Congreso de la Unión	1917 Párrafo adicionado DOF 08-02-2012	Art. 4	Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos.
			Título II Art. 14	En el ámbito federal, "la Comisión" acreditará, promoverá y apoyará la organización de los usuarios para mejorar el aprovechamiento del agua y la preservación y control de su calidad, y para impulsar la participación de éstos a nivel nacional, estatal, regional o de cuenca.
Ley de aguas Nacionales	Cámara de Diputados del Honorable Congreso de la Unión	1 de diciembre de 1992	Título III Art. 15 bis	El agua es un bien de dominio público federal, vital, vulnerable y finito, con valor social, económico y ambiental, cuya preservación en cantidad y calidad y sustentabilidad es tarea fundamental del Estado y la Sociedad, así como prioridad y asunto de seguridad nacional.
			Título VI Art. 83	"La Comisión", a través de los Organismos de Cuenca, en coordinación con los gobiernos estatales y municipales, o en concertación con personas físicas o morales, deberá construir y operar, según sea el caso, las obras para el control de avenidas y protección de zonas inundables, así como caminos y obras complementarias que hagan posible el mejor aprovechamiento de las tierras y la protección a centros de población, industriales y, en general, a las vidas de las personas y de sus bienes.

Fuente: *Elaboración propia a partir del marco normativo de México*

Tabla 9. (Continuación)

TITULO	ORGANISMO	FECHA	NORMA	OBJETIVO
			Título VI Art. 84	"La Comisión" determinará la operación de la infraestructura hidráulica para el control de avenidas y tomará las medidas necesarias para dar seguimiento a fenómenos climatológicos extremos, promoviendo o realizando las acciones preventivas que se requieran; asimismo, realizará las acciones necesarias para atender las zonas de emergencia hidráulica o afectadas por fenómenos climatológicos extremos".
			Título VIII Art. 96 bis	i. Regulen y conduzcan el agua, para garantizar la disponibilidad y aprovechamiento del agua en las cuencas, salvo en los casos en los cuales hayan sido realizadas o estén expresamente al cargo y resguardo de otros órdenes de gobierno; ii. Controlen, y sirvan para la defensa y protección de las aguas nacionales, así como aquellas que sean necesarias para prevenir inundaciones, sequías y otras situaciones excepcionales que afecten a los bienes de dominio público hidráulico;
Ley de aguas Nacionales	Cámara de Diputados del Honorable Congreso de la Unión	1 de diciembre de 1992	Art. 99	"La Autoridad del Agua" proporcionará a solicitud de los inversionistas, concesionarios o asignatarios, los apoyos y la asistencia técnica para la adecuada construcción, operación, conservación, mejoramiento y modernización de las obras hidráulicas y los servicios para su operación. "La Autoridad del Agua" proporcionará igualmente los apoyos y la asistencia técnica que le soliciten para la adecuada operación, mejoramiento y modernización de los servicios hidráulicos para su desarrollo auto sostenido, mediante programas específicos que incluyan el manejo eficiente y la conservación del agua y el suelo.
			Art. 100	"La Comisión" establecerá las normas o realizará las acciones necesarias para evitar que la construcción u operación de una obra altere desfavorablemente las condiciones hidráulicas de una corriente o ponga en peligro la vida de las personas y la seguridad de sus bienes o de los ecosistemas vitales.

Fuente: Elaboración propia a partir del marco normativo de México

Tabla 9. (Continuación)

TITULO	ORGANISMO	FECHA	NORMA	OBJETIVO
			Art. 101	"La Comisión" realizará por sí o por terceros las obras públicas federales de infraestructura hidráulica que se desprendan de los programas de inversión a su cargo, conforme a la Ley y disposiciones reglamentarias. Igualmente, podrá ejecutar las obras que se le soliciten y que se financien total o parcialmente con recursos distintos de los federales.
Ley de aguas Nacionales	Cámara de Diputados del Honorable Congreso de la Unión	1 de diciembre de 1992	Art.109	Las inversiones públicas en obras hidráulicas federales se recuperarán en la forma y términos que señale la Ley de Contribución de Mejoras por Obras Públicas Federales de Infraestructura Hidráulica, mediante el establecimiento de cuotas de autosuficiencia que deberán cubrir las personas beneficiadas en forma directa del uso, aprovechamiento o explotación de dichas obras.
			Art. 110	La operación, conservación y mantenimiento de la infraestructura hidráulica se efectuarán con cargo a los usuarios de los servicios respectivos. Las cuotas de autosuficiencia se determinarán con base en los costos de los servicios, previa la valuación de dichos costos en los términos de eficiencia económica.
Programa sectorial: Medio Ambiente y Recursos Naturales	Plan Nacional de Desarrollo	2013 - 2018	Objetivo. 3	Meta Nacional: México próspero. Fortalecer la gestión integrada y sustentable del agua, garantizando su acceso a la población y a los ecosistemas. Mediante el programa sectorial de Agua Potable, Drenaje y Tratamiento.
Programa Presupuestario Agua Potable, Drenaje y Tratamiento	CONAGUA	28 de diciembre de 2016	Art. 4.	Contribuir a disminuir la falta de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento que son factores relacionados con la pobreza, a través de fortalecer e incrementar la cobertura de estos servicios.
Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente	Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión	28 de enero de 1988 Última reforma DOF 04-06-2012	Art. 8	La aplicación de las disposiciones jurídicas en materia de prevención y control de la contaminación de las aguas que se descarguen en los sistemas de drenaje y alcantarillado de los centros de población, así como de las aguas nacionales que tengan asignadas, con la participación que conforme a la legislación local en la materia corresponda a los gobiernos de los estados.

Fuente: Elaboración propia a partir del marco normativo de México

Tabla 9. (Continuación)

TITULO	ORGANISMO	FECHA	NORMA	OBJETIVO
Ley de Protección Ambiental para el Desarrollo Sustentable del Estado de Querétaro	Gobernación constitucional del Estado de Querétaro	31 de julio de 2009	Art. 53	Los programas de vivienda y las acciones que se emprendan en esta materia por las autoridades competentes, deberán incluir disposiciones relativas a el empleo de dispositivos y sistemas de ahorro de agua potable, así como de captación, almacenamiento y utilización de aguas pluviales.
			Art.112	Para el aprovechamiento sustentable del agua se considerará el incremento de la calidad y la cantidad del agua; su uso eficiente en la industria y la agricultura; el tratamiento y reúso de las aguas residuales; la conciencia de toda la población para evitar el desperdicio; y la captación y aprovechamiento de las aguas pluviales.
Reglamento para el uso eficiente Del agua en las poblaciones del estado de Querétaro	Gobierno Del Estado	29 de mayo de 1997	Art. 4	Coordinar las acciones necesarias para el manejo integral de los servicios, el cual busque construir la infraestructura para separar y aprovechar las aguas pluviales de las residuales, promover el reúso y la reutilización de las aguas residuales, así como el intercambio de aguas claras por aquellas que cuando no se requiera de tal calidad y las demás acciones para la mejor administración de las aguas.
			Art. 6	El Organismo Operador tendrá la obligación de realizar las acciones necesarias para mantener en buen estado la infraestructura para la prestación de los servicios públicos de Agua Potable, Alcantarillado y Tratamiento de Aguas.
			Art.7	El riego de áreas verdes en la vía pública, parques y jardines públicos en las zonas urbanas, será responsabilidad de los municipios, para lo cual utilizarán preferentemente aguas residuales tratadas que cumplan con las Normas Oficiales Mexicanas respectivas, o en su caso, con aguas pluviales en los términos y condiciones técnicas que determine el Organismo Operador.
			Art. 21	Las descargas al sistema de alcantarillado, deberán ajustarse a lo dispuesto en el Reglamento para el control de descargas, publicado en el Periódico Oficial del Gobierno del Estado, el 4 de abril de 1996.

Fuente: *Elaboración propia a partir del marco normativo de México*

Tabla 9. (Continuación)

TITULO	ORGANISMO	FECHA	NORMA	OBJETIVO
Reglamento para el uso eficiente Del agua en las poblaciones del estado de Querétaro	Gobierno Del Estado	29 de mayo de 1997	Art.112	Para el aprovechamiento sustentable del agua se considerará el incremento de la calidad y la cantidad del agua; su uso eficiente en la industria y la agricultura; el tratamiento y reúso de las aguas residuales; la conciencia de toda la población para evitar el desperdicio; y la captación y aprovechamiento de las aguas pluviales.

Fuente: Elaboración propia a partir del marco normativo de México

6 ÁREA DE ESTUDIO

SANTIAGO DE QUERÉTARO

La ciudad de Santiago de Querétaro se encuentra ubicada en el Estado de Querétaro, con una altura de 1,832 metros sobre el nivel del mar y una extensión territorial de 898.17 km², representando el 5.9% de la superficie total de la entidad. Este territorio colinda al sur con los municipios de Corregidora y Huimilpan, al este con El Marqués y al noroeste con el Estado de Guanajuato. Además, cuenta con 233 comunidades, integradas en 7 delegaciones, con una población de 801,940 habitantes, de acuerdo con los datos del Censo de Población y vivienda de 2010 realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (Municipio de Querétaro, 2015; INEGI, 2017).

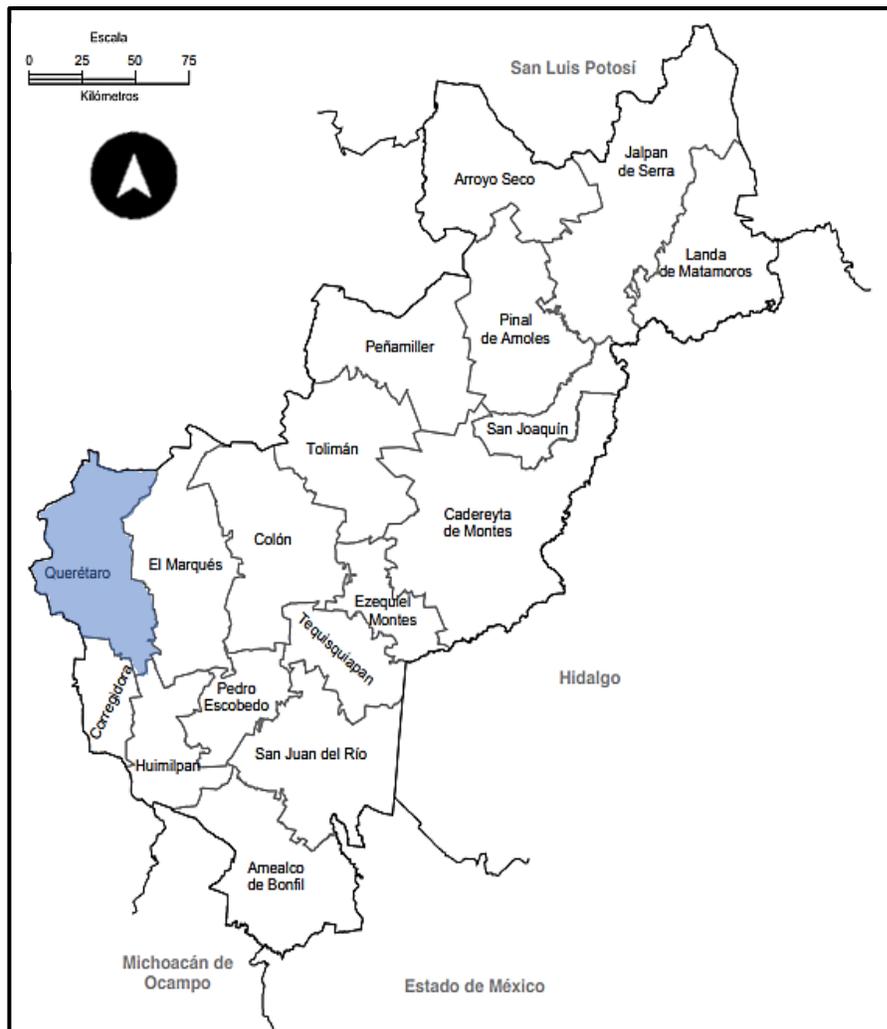


Figura 5. Ciudad Santiago de Querétaro

Fuente: Adaptado de INEGI

La ciudad se localiza en una zona que presenta heterogeneidad de relieve, debido a su origen y procesos transformadores. Esta circunstancia, gracias a su geología ígnea y presencia de climas templados y secos, provoca que exista una diversidad ambiental que modifica las características

y propiedades del suelo a lo largo del territorio generando una diversidad de suelos; la temperatura promedio anual es de 18.7 °C y una precipitación media anual de 554.6 mm; (Municipio de Querétaro y Unidad Municipal de Protección civil, 2015; INEGI, 2017).

La principal corriente hídrica es el Río Querétaro, que se ubica en la parte central del área urbana; además, cuenta con 230 escurrimientos intermitentes y 175 cuerpos de aguas. De acuerdo con La Comisión Nacional de aguas, este territorio pertenece a la Región Hidráulica Administrativa VIII Lerma Santiago-Pacífico (Municipio de Querétaro y Unidad Municipal de Protección civil, 2015).

Santiago de Querétaro es eminentemente urbano, incluyendo un cinturón verde en su periferia. En 2011, el 18% de su territorio se sembraba, la mayor parte del cultivo es para autoconsumo y parcialmente para alimento de ganado. Los cultivos más importantes del municipio son maíz, frijol y en menor medida, el sorgo, la cebada, y la alfalfa. Por otra parte, en esta misma zona se desarrolla la crianza de ganado, principalmente porcino y en menor medida vacuno (Municipio de Querétaro, 2015).

- **Consideraciones para la selección del caso de estudio**

Para contemplar el área de estudio se seleccionó la ciudad de Santiago de Querétaro por los problemas asociados con el deterioro de sus recursos naturales, alterando el medio natural y restringiendo su aprovechamiento. Asimismo, se destaca el continuo proceso de urbanización que ha desencadenado la degradación física del suelo, contaminación de los recursos naturales, el deterioro de los ecosistemas, la segregación de espacios y hacinamiento humano (Municipio de Querétaro y Unidad Municipal de Protección civil, 2015).

Por otra parte, existe baja disponibilidad del recurso hídrico y una alta demanda por los nuevos desarrollos inmobiliarios. Sumado a esto, el Río Querétaro y el canal El Arenal son los puntos de mayor contaminación; puesto que, recibe descargas sanitarias y residuales derivadas del sector industrial, agrícola y residencial (Municipio de Querétaro y Unidad Municipal de Protección civil, 2015; Municipio de Querétaro, 2015).

Dada a las características del municipio de Querétaro, este se encuentra expuesto a diversos fenómenos como inundaciones, lluvias intensas, deslaves y derrumbes; debido a su ubicación en el Cinturón Volcánico y su configuración de llanura aluvial (Municipio de Querétaro y Unidad Municipal de Protección civil, 2015). De acuerdo con el Atlas de Riesgos del municipio, se presenta una vulnerabilidad “alta” por lluvias extraordinarias, “muy alta” por riesgo a inundaciones (Municipio de Querétaro y Unidad Municipal de Protección civil, 2015).

Finalmente, el municipio cuenta con unidades habitacionales de viviendas de interés social, que son objeto de estudio del presente trabajo. También se tomó la decisión de seleccionar esta área por la facilidad de adquisición de datos y cercanía a la Ciudad de México, lugar donde se llevará a cabo el proyecto de investigación. Vale la pena mencionar que esta zona cuenta con las condiciones y características necesarias para la implementación de sistemas urbanos de drenaje convencional o sostenible, en relación con la zonificación Geotécnica de las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcción para la Ciudad de México (2004).

Fraccionamiento Rancho Bellavista

El conjunto de vivienda de interés social Fraccionamiento Rancho Bellavista se encuentra ubicado al sureste de la ciudad Santiago de Querétaro, en la delegación Felipe Carrillo Puerto. El área del terreno es de 198,640.55 m², como se muestra en la Figura 6, y cuenta con 1,188 lotes habitacionales para 5,940 habitantes (Beltrán, 2011).



Figura 6. Localización del caso de estudio
Fuente: Capturado de Google Earth 2018



Figura 7. Fotografías del Fraccionamiento Rancho Bellavista, Querétaro

7 METODOLOGÍA

La evaluación de los impactos ambientales, sociales y económicos del sistema de drenaje urbano convencional frente al sistema de drenaje urbano sostenible en un desarrollo habitacional de la ciudad de Santiago de Querétaro se llevó a cabo en tres partes descritas de manera general en la Figura 8.

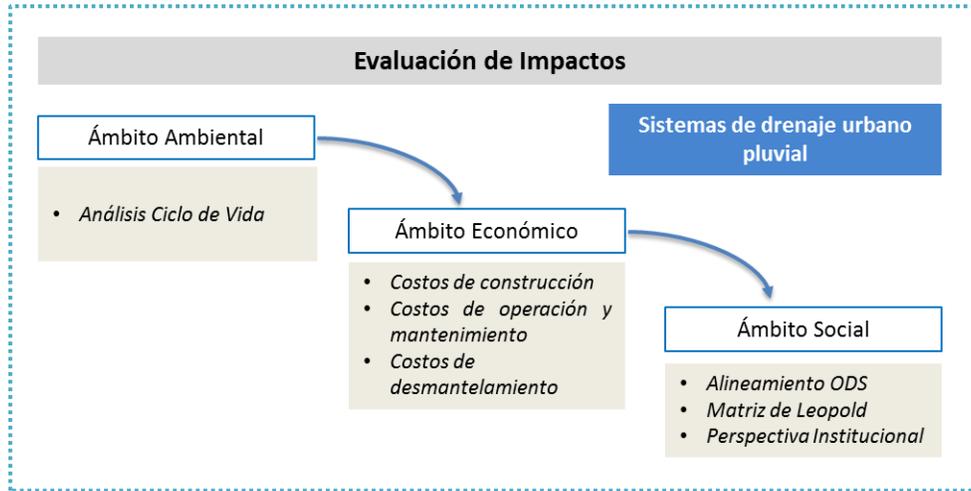


Figura 8. Metodología general para la evaluación de impactos ambientales, sociales y económicos

7.1 ÁMBITO AMBIENTAL

Para el desarrollo de este proyecto, se empleó la metodología de ACV para cada uno de los sistemas de drenaje urbano pluvial, permitiendo determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados con las tecnologías.

7.1.1 Definición de objetivo y alcance del Análisis Ciclo de Vida

a) Objetivo

Evaluar los impactos ambientales del tren de tratamiento de los sistemas de drenaje urbano convencional y los sistemas de drenaje urbano sostenible mediante Análisis Ciclo de Vida, en aras de proponer recomendaciones para su implantación en viviendas de interés social de la ciudad Santiago de Querétaro, considerando el desempeño del este servicio en el marco del desarrollo sostenible.

b) Alcance

El ACV de los sistemas de drenaje urbano y convencional analizará todo su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas para su construcción hasta su disposición final. Lo anterior, evaluado para el caso de viviendas de interés social Fraccionamiento Rancho Bellavista en la delegación Felipe Carrillo Puerto de la ciudad Santiago de Querétaro.

7.1.2 Funciones del sistema

a) **Sistemas de drenaje urbano convencional**

Recepción, canalización y evacuación de agua pluvial de la manera más rápida y eficaz posible, mediante obras hidráulicas.

b) **Sistemas de drenaje urbano sostenible**

Recepción, canalización y evacuación de agua pluvial respetando el ciclo hidrológico natural, mediante elementos paisajísticos e infraestructura.

7.1.3 Unidad Funcional

La unidad funcional (UF) que se consideró en este análisis es la captación de 1 m³ de agua pluvial en el área de vivienda de interés social Fraccionamiento Rancho Bellavista de la delegación Felipe Carrillo Puerto de la ciudad Santiago de Querétaro. Para ello, se consideró que los sistemas de drenaje pluvial convencional tienen una vida útil de 50 años (CONAGUA, 2016) y los SUDS entre 20 y 35 años (Flynn y Traver, 2013; Vineyard *et al.*, 2015; CIRIA, 2015), el cual se encuentra directamente relacionado con las actividades de operación y mantenimiento, puesto que pueden o no maximizar su vida útil. El presente ACV tomó como base 50 años para la comparación de ambas infraestructuras.

La UF se definió en relación a los estudios realizados por Jeong *et al.* (2013), Vineyard *et al.* (2015) y Amores (2013), que tomaron como unidad, la captación de volumen de agua de lluvia un sistema de drenaje pluvial.

7.1.4 Límites del Análisis Ciclo de Vida

De acuerdo con el objetivo y alcance del estudio se consideraron los siguientes límites:

- a) **Límite espacial:** El estudio comprendió el conjunto de VIS Fraccionamiento Rancho Bellavista en la delegación Felipe Carrillo Puerto de la ciudad Santiago de Querétaro, México. Este conjunto cuenta con un área total de 198,640.55 m².
- b) **Límite temporal:** Se consideró como escenario base la captación de agua pluvial en un periodo de tiempo de 50 años para la comparación de ambos sistemas de drenaje pluvial.
- c) **Límite por tipo de drenaje:** Se estudió un sistema de drenaje urbano convencional pluvial (de tipo superficial longitudinal) y un tren de sistemas de drenaje urbano sostenible (pavimento permeable + área de biorretención) conforme a las características del área de estudio.
- d) **Límite de software:** La modelación de los datos recopilados en el inventario ACV se desarrolló mediante el software SimaPro de PRé Consultants, utilizando el método ReCiPe de punto medio y siguiendo las recomendaciones de la norma ISO 14040 (2006).
- e) **Límite de información:** Las etapas analizadas en el ACV no consideraron la mano de obra necesaria para llevar a cabo las actividades, el equipamiento y el mantenimiento de las infraestructuras. La información recabada parte de información bibliográfica y supuestos adaptados al área de estudio (Fraccionamiento Rancho Bellavista).

7.1.5 Desarrollo de inventarios para el Análisis Ciclo de Vida

La recopilación de la información para elaborar el inventario de ACV estuvo de acuerdo con la bibliografía encontrada considerando las etapas de construcción, operación y desmantelamiento de los sistemas urbanos de drenaje pluvial tanto convencional como sostenible (Ver Figura 9). Para ello, se tiene en cuenta las entradas y salidas de cada proceso en función de la unidad funcional. Esta etapa es crucial para obtener buenos resultados y obtener una evaluación de impactos comparativa.

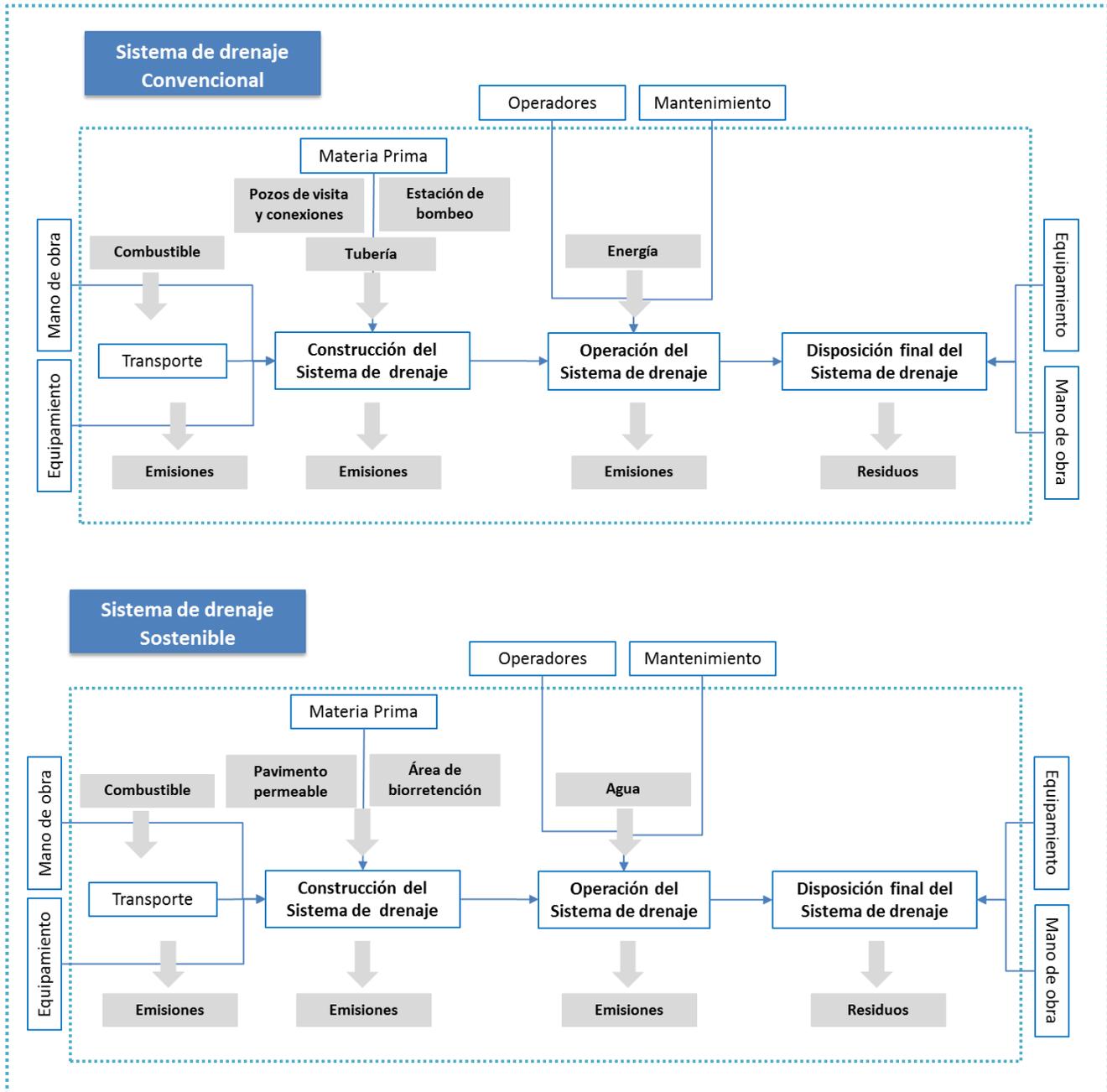


Figura 9. Sistema de drenaje urbano pluvial para la construcción del inventario ACV
Fuente: Elaboración propia

En el desarrollo del inventario de ciclo de vida se consideraron las etapas de construcción, operación y desmantelamiento. Para ello, se obtuvo la información necesaria para llevar a cabo el proceso de asignación de entradas y salidas de cada uno de los sistemas considerando la UF. En el caso del sistema convencional se tomaron los datos de los planos registrados en la Comisión Estatal de Aguas de Querétaro (CEA) y el trabajo desarrollado por Beltrán (2011) referente al sistema de drenaje pluvial para el Fraccionamiento Rancho Bellavista. Para el sistema de drenaje sostenible se tomaron como base los estudios de Flynn y Traver (2013), Albellan (2013), Rodríguez (2017) y Carrillo (2016) para el diseño y cálculo de las entradas y salidas de este sistema, en este caso, pavimentos permeables y área de biorretención. En los Anexos 2 y 3 se detallan los elementos considerados para el diseño de cada uno de los sistemas de drenaje.

La Figura 10 muestra cómo están ubicados cada una de las infraestructuras en el conjunto de VIS Fraccionamiento Rancho Bellavista.

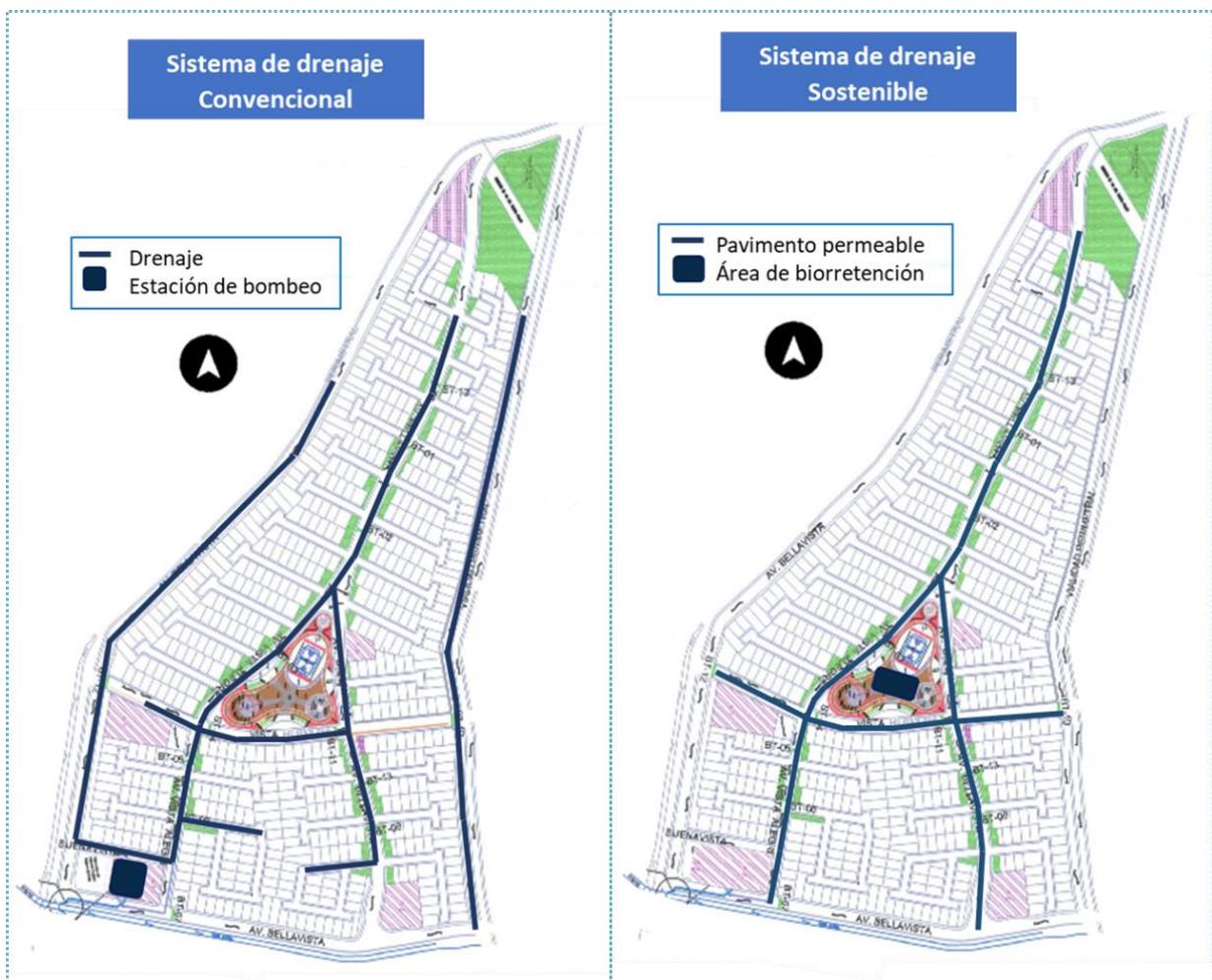


Figura 10. Sistema de drenaje pluvial Fraccionamiento Rancho Bellavista

7.1.5.1 Consideraciones del inventario del Sistema urbano de drenaje convencional

A partir del trabajo realizado por Beltrán (2011) y los planos de la infraestructura elaborados por la CEA, se tomaron los datos de diseño para generar el inventario de entradas en las etapas de construcción, operación y desmantelamiento, estos fueron:

- Área del uso del suelo.
- Intensidad de lluvia.
- Gasto o caudal del proyecto.
- Coeficiente de escurrimiento.
- Tipo de tubería, diámetros y longitud.
- Coeficiente de rugosidad.
- Número de pozos de visita (tipo caja, común, especial).
- Número de registros pluviales.
- Número de coladeras.
- Número de brocales y tapas fo.fo.
- Número de bombas y potencia.
- Área de excavación, volumen de plantilla, relleno y acarreo.

Los cálculos de diseño se muestran de manera detallada en el Anexo 2 del presente trabajo.

7.1.5.2 Consideraciones del inventario del Sistema urbano de drenaje sostenible

Con base al manual CIRIA (2001) y Minnesota Stormwater (2018) se escogió el tipo de SUDS a implementar en el conjunto de VIS. Para este caso se eligieron pavimentos permeables y área de biorretención de acuerdo a las características del área de estudio. Su diseño tomo en cuenta lo siguiente:

- Se tuvo en cuenta datos iniciales de la red de drenaje existente, así como el área.
- A partir del método racional se calculó el gasto o caudal del proyecto, considerando la intensidad de lluvia, área y coeficiente de escorrentía; esto para cada estructura (pavimento permeable y área de biorretención).
- El espesor se calculó directamente en base a los rangos de valores recomendados por el manual.
- El cálculo del volumen se determinó a partir del área y espesor para el caso del pavimento permeable, así como los contenidos de masa para el área de biorretención.
- Se determinó los materiales para cada tipo de drenaje.

Los cálculos de diseño se muestran de manera detallada en el Anexo 3 del presente trabajo.

Otro aspecto importante que se consideró para la etapa de operación fue el secuestro de carbono a partir del trabajo realizado por Flynn y Traver (2013); las especies vegetales fueron escogidas mediante el Catálogo de plantas nativas del Estado de Querétaro (FIQMA, 2018).

Las distancias para el transporte de materiales desde las tiendas de materiales de construcción al fraccionamiento y para el transporte de residuos desde el área de estudio hasta el relleno sanitario se tomaron mediante google earth, arrojando los valores de 7.5 km y 14.2 km respectivamente. Lo anterior, aplica para ambos sistemas urbanos de drenaje pluvial.

7.1.6 Método para la evaluación del impacto

El método de evaluación empleado en el ACV fue ReCiPe de punto medio, el cual desarrolla procedimientos orientados a la cuantificación de los impactos durante el ciclo de vida, calculando las emisiones de las sustancias peligrosas y la extracción de recursos naturales para cada categoría de impacto utilizando indicadores específicos (Goedkoop, et al., 2013). Estas categorías de impacto deben reflejar aspectos de relevancia ambiental directa para el caso de estudio. El método se basa en el cálculo de factores de caracterización, los cuales se aplican para convertir los resultados del análisis del inventario a la unidad común de una categoría y son obtenidos mediante modelos de caracterización (Goedkoop et al., 2013), estos modelos se describen brevemente en el siguiente apartado (ver 7.1.7) y son llevados a cabo mediante el software SimaPro.

7.1.7 Categorías de impacto ambiental

En función del objetivo y alcance del ACV se estableció categorías de impacto de punto medio para valorar los efectos ambientales generados por cada proceso unitario. En la Tabla 10 se enuncian las categorías de impacto empleadas para la evaluación de los sistemas de drenaje urbano pluvial. Éstas se seleccionaron de acuerdo a la revisión de literatura referente a ACV por autores como, Flynn y Traver, 2013; Wang *et al.*, 2013, Vineyard *et al.*, 2015 y Petit-Boix, 2015; asimismo, se consideró la ubicación geográfica del área de estudio, ya que se encuentra en una zona habitacional de VIS y debido a que el ciclo de vida de los sistemas de drenaje genera impactos en diferentes vectores, así como, el consumo de recursos; se buscó seleccionar las categorías que proporcionara una perspectiva global.

Tabla 10. Categorías de impacto para el Análisis Ciclo de Vida

CATEGORÍA DE IMPACTO	ABREV.	UNIDAD	FACTOR DE CARACTERIZACIÓN
Cambio climático	CC	Kg CO ₂ eq	Potencial de calentamiento global
Agotamiento de la capa de ozono	ACO	Kg CFC – 11 eq	Potencial de reducción de la capa de ozono
Toxicidad humana	TH	Kg 1,4 – DB eq	Potencial de toxicidad humana
Acidificación terrestre	AT	Kg SO ₂ eq	Potencial de acidificación terrestre
Eutrofización de agua dulce	EAD	Kg P eq	Potencial de eutrofización de agua dulce
Ocupación del suelo urbano	OS	m ²	Potencial de ocupación del suelo urbano

Nota: CO₂: Dióxido de carbono, P: Fosforo, CFC: Clorofluorocarbono, SO₂: Dióxido de azufre, DB: diclorobenceno. Eq: equivalente

Fuente: Adaptado de Recipe, 2008

- a) **Cambio Climático:** Hace referencia a los posibles cambios en el clima causados por la acumulación de productos químicos conocidos como gases de efecto invernadero, ocasionando efectos adversos sobre los ecosistemas, la salud humana y el estado de los materiales. Este indicador emplea el factor de Potencial de Calentamiento Global (GWP) y el indicador de gases de efecto invernadero (GEI) (INECC, 2015; Güereca, 2006). La cuantificación del impacto en esta categoría mediante el método ReCiPe se deriva de la habilidad de los GEI para absorber el calor y de su permanencia en la atmósfera. Estas propiedades se comparan con las propiedades del dióxido de carbono (CO₂) y son convertidas en CO₂ equivalentes (eq), lo cual permite sumar los equivalentes de diferentes GEI para obtener un indicador (Ruiz, 2016). Esta categoría emplea los factores de

equivalencia de CO₂ publicados por el IPCC (2007), los cuales son calculados mediante la Ecuación 1.

Ecuación 1. Factor de equivalencia para la categoría de cambio climático

$GWP_{x,T} = \frac{\int_0^T a_x \times [x(t)] dt}{\int_0^T a_r \times [r(t)] dt}$	Donde, GWP _{x,t} = Calentamiento global de la sustancia x T = Horizonte temporal a _x = Eficiencia de la radiación [x(t)] = Abundancia dependiente del tiempo
---	--

Fuente: Goedkoop et al., 2013

- b) Agotamiento de la capa de ozono:** El incremento de las emisiones al aire de compuestos que tienen átomos de cloro (Cl) o bromo (Br) y reaccionan en la atmosfera formando clorofluorocarbonados (CFC) ocasionan un incremento en la tasa de destrucción del ozono, y aumentando los niveles de radiación ultravioleta que llegan a la superficie de la tierra, lo cual, maximiza las probabilidades de sobreexposición y ocasiona efectos adversos sobre la salud humana y los ciclos naturales. Esta categoría emplea el factor de Potencial de agotamiento del ozono (ODP), el cual se puede calcular mediante la Ecuación 2 del método ReCiPe.

Ecuación 2. Factor de equivalencia para la categoría de agotamiento de la capa de ozono

$\Delta OD_j = \sum_{i \in j} \Delta m_i \times ODP_i(\infty)$	Donde, ΔOD = Agotamiento de la capa de ozono Δm _i = cantidad evitada de ODP en i del grupo j ODP _i (∞) = Factor de equivalencia
--	--

Fuente: Goedkoop et al., 2013

- c) Acidificación Terrestre:** Refleja los cambios en el suelo por la presencia de sustancias inorgánicas, como sulfatos, nitratos y fosfatos que causan un cambio en la acidez del suelo, dañando a los organismos vivos y su entorno. Este indicador emplea el factor de Potencial de acidificación terrestre expresado en dióxido de azufre equivalente (SO₂ eq); el cálculo se realiza mediante la Ecuación 3 del método ReCiPe. Esta categoría emplea el modelo de saturación base (BS) como un indicador para expresar la acidez. Las principales emisiones acidificantes son óxidos de nitrógeno (NO_x), amoníaco (NH₃) y dióxido de azufre (SO₂) (Goedkoop et al., 2013).

Ecuación 3. Factor de equivalencia para la categoría de acidificación terrestre

$TAP = \frac{FF_x}{FF_{SO_2}}$	Donde, TAP = Potencial de acidificación terrestre FF _x = Factor de acidificación de la sustancia x FF _{SO₂} = Factor de acidificación de SO ₂
--------------------------------	--

Fuente: Goedkoop et al., 2013

- d) Eutrofización:** Incluye los impactos a causa de un nivel elevado de nitrógeno y fósforo en el agua o en el suelo, ocasionando cambios indeseables en la composición de especies y en la producción de biomasa en los ecosistemas tanto acuáticos como terrestres

(Betancourt, 2017; Ruiz, 2016). La caracterización del impacto en esta categoría considera aquellos compuestos que limitan el rendimiento de la biomasa acuática y pueden generar un cambio indeseable en la composición de especies. El modelo de caracterización que se emplea se conoce como CARMEN por sus siglas en inglés (Cause effect Relation Model to Support Environmental Negotiations), el cual calcula el cambio en la carga de nutrientes del agua; además de evaluar el factor de persistencia de eutrofización mediante la Ecuación 4.

Ecuación 4. Factor de persistencia de eutrofización

$$FF_x = \frac{dC_{x,j}}{dM_x}$$

Donde,

FF_x = Factor de persistencia de eutrofización

$dC_{x,j}$ = Incremento de concentración marginal

dM_x = Tasa de emisión

Fuente: Goedkoop et al., 2013

- e) **Toxicidad Humana:** Hace referencia a la habilidad inherente de algunos químicos de causar daños sistemáticos a los organismos vivos o a los ecosistemas. La exposición a estos compuestos depende de factores como la concentración, condiciones del receptor, tipo y tiempo de exposición (INECC, 2015). El factor de caracterización para esta categoría se encuentra asociado con el tiempo de persistencia y la acumulación de sustancias tóxicas para el ser humano; la manera como se calcula se muestra en la Ecuación 5 del método ReCiPe (Goedkoop et al., 2013).

Ecuación 5. Factor de caracterización para la categoría de impacto toxicidad humana

$$F_{j,i,x} = \frac{dC_{j,x}}{dM_{i,x}}$$

Donde,

$F_{j,i,x}$ = Fracción de consumo de la población de la sustancia x.

$C_{j,x}$ = Cambio marginal en el estado constante de x

$M_{j,x}$ = Cambio marginal en la emisión de x

Fuente: Goedkoop et al., 2013

- f) **Ocupación del Suelo:** Refleja el daño ocasionado a los ecosistemas debido a los efectos de ocupación y transformación de suelo, así como: la ocupación de suelo agrícola, la ocupación de suelo urbano y la transformación de suelo natural (Mattila et al., 2011). La cuantificación del impacto en esta categoría emplea la cantidad de área de suelo ocupado en m². La Ecuación 6 muestra cómo se calcula el factor de caracterización a punto medio según el método ReCiPe.

Ecuación 6. Factor de caracterización para la categoría de ocupación de suelo

$$CF_{\text{área}} = 1; A_o \times t$$

Donde,

$CF_{\text{área}}$ = Factor de caracterización del suelo ocupado

A_o = Cantidad de área ocupada

t = Tiempo

Fuente: Goedkoop et al., 2013

7.2 ÁMBITO ECONÓMICO

Los impactos económicos asociados a los sistemas de drenaje urbano convencional y sostenible se basan en sus costos de inversión, operación y desmantelamiento (Mendieta, 1999; Garibotto, 1999), lo cual permitió establecer un marco para estimar cual opción es más adecuada en términos de sostenibilidad para la ciudad Santiago de Querétaro.

La obtención de los datos a partir de la estimación de insumos y procesos requeridos para el desarrollo de infraestructura de drenaje pluvial se realizó mediante el Catálogo general de precios unitarios para la construcción de sistemas de agua potable y alcantarillado de CONAGUA (2017). Los precios encontrados se adaptaron a los requerimientos de cada una de las distintas actividades que incurre en los sistemas de drenaje urbano pluvial; así como las etapas de construcción, operación y desmantelamiento; además de las características específicas del conjunto de VIS fraccionamiento Rancho Bellavista, con la finalidad de analizar qué tipo de drenaje es más viable implementar al menor costo posible, sin dejar de lado los resultados en el ámbito ambiental y social.

7.2.1 Valor presente Neto

El análisis de costos se realizó mediante el método de Valor Presente Neto (VPN), también conocido como Valor Actual Neto (VAN), el cual permite determinar el valor presente de una inversión inicial (costos de construcción) y una serie de pagos futuros (costos de operación, mantenimiento y desmantelamiento) del proyecto que se desea realizar; en este caso, la implementación de los sistemas urbanos de drenaje pluvial en el conjunto de VIS Fraccionamiento Rancho Bellavista. En este orden de ideas, el VPN proporciona una estimación del coste total del proyecto. La Ecuación 7 muestra la manera para calcular este valor (Toronto and Region Conservation y University of Toronto, 2013; Petit-Boix, 2015).

Ecuación 7. Valor Presente Neto

$$VPN = I + \sum_{t=1}^T \frac{costos_t}{(1+r)^t}$$

Donde,

I = Inversión inicial

r = Tasa de descuento

t = Periodo

El horizonte de evaluación del proyecto se consideró en 30 años como intermedio de la vida útil de ambas infraestructuras de drenaje pluvial, llevando ambos sistemas a una misma escala de tiempo. Para comparar ambos sistemas de drenaje pluvial se utilizó una tasa de descuento del 10% anual acorde a los lineamientos publicados por la Secretaria de Hacienda y Crédito Público (SHCP) para la evaluación de proyectos de construcción de infraestructura. Adicionalmente, la tasa de interés anual aplicada a cada uno de los años fue de 7%, de acuerdo con el Banco de México para el año 2017.

Los conceptos para las etapas de construcción, operación y desmantelamiento de ambas infraestructuras (convencional y sostenible) se determinaron con relación al inventario de ACV del presente trabajo. Para la etapa de mantenimiento del sistema urbano de drenaje convencional se tomó las especificaciones establecidas en el Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Drenaje pluvial urbano N°19 de CONAGUA (2016), el cual considera una

inspección periódica mediante sondeos, lavados y limpieza de los elementos que componen la red de drenaje. En el caso de los SUDS se tomó las recomendaciones propuestas en Minnesota Stormwater Manual (2018) para pavimentos permeables y áreas de biorretención, en éste se considera una limpieza rutinaria y profunda que comprende el desyerbe, poda, limpieza a mano y lavado con agua a presión.

Los conceptos para cada una de las actividades dentro del ciclo de vida de los sistemas urbanos de drenaje pluvial en el área de estudio se adaptaron a los conceptos descritos en el Catálogo de precios unitarios de CONAGUA (2017), en el cual se incluye el coste por instalación, equipos, suministro de materiales y mano de obra, entre otros, necesarios para llevar a cabo cada una de las actividades. La información más detallada se describe en el Anexo 4.

7.2.2 Límites del Análisis de costos

Para el desarrollo del análisis económico del presente estudio se consideraron los siguientes límites:

- a) **Límite espacial:** Los costes se establecieron para la implementación de los sistemas de drenaje pluvial en el conjunto de VIS Fraccionamiento Rancho Bellavista en la delegación Felipe Carrillo Puerto de la ciudad Santiago de Querétaro.
- b) **Límite temporal:** Se consideró como escenario base 30 años para representar el ciclo de vida de los sistemas de drenaje urbano pluvial de modo que sean comparables.
- c) **Límite por tipo de drenaje:** Se identificaron los costes para las etapas de construcción, operación, mantenimiento y desmantelamiento de un sistema de drenaje urbano convencional pluvial (de tipo superficial longitudinal) y un tren de sistemas de drenaje urbano sostenible (pavimento permeable + área de biorretención).
- d) **Límite de información:** Los datos recopilados se obtuvieron mediante el Catálogo de precios unitarios de CONAGUA (2017); debido a que el municipio de Querétaro no cuenta con un catálogo de este tipo. Asimismo, se consideran las tasas de interés anual y tasa de descuento para el año 2017, según la SHCP y el Banco de México.

7.3 ÁMBITO SOCIAL

La evaluación de los impactos sociales se realizó mediante una metodología mixta, cuantitativa y cualitativa. Para ello, se alinearon cada uno de los sistemas de drenaje pluvial con los Objetivos del Desarrollo Sostenible establecidos en la Agenda 2030, con la finalidad de establecer categorías para la identificación de los impactos sociales y posteriormente evaluarlos mediante la matriz de Leopold (matriz causa-efecto). Adicionalmente, se desarrollaron entrevistas semiestructuradas, con el objetivo de conocer la perspectiva a nivel institucional acerca de la implementación de los drenajes en las VIS de la ciudad de Santiago de Querétaro, de modo que se evidenciará la necesidad de realizar tipo este análisis.

Vale la pena mencionar que no se encontró información bibliográfica para la evaluación de impactos sociales de los sistemas urbanos de drenaje convencional en comparación con los SUDS con enfoque de ciclo de vida. Trabajos realizados por HR Wallingford *et al.*, (2003) y Jarvie *et al.*, (2017) analizaron la percepción social de los SUDS en Reino Unido enfatizando los beneficios que estos proveen a la población. En relación a los sistemas convencionales reportes como el de CEPEP (1998) realizan valoraciones costo/beneficio de las infraestructuras. Por este motivo, se propuso la presente metodología para la identificación de los impactos sociales de los sistemas urbanos de drenaje pluvial convencional y sostenible a lo largo de su ciclo de vida en las etapas de construcción, operación y desmantelamiento.

7.3.1 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Es importante realizar una alineación de cada uno de los sistemas urbanos de drenaje pluvial con los ODS; debido a que estos establecen estrategias para mejorar el bienestar y la calidad de vida de la población, mediante la aplicación de metas que permitan llegar al desarrollo sostenible del área de estudio. En relación con lo anterior, en la Tabla 11 se evidencian los objetivos y metas asociadas con los sistemas urbanos de drenaje. Estos fueron seleccionados considerando la problemática que se evidencia en la ciudad de Santiago de Querétaro con relación a la gestión de las aguas pluviales.

Tabla 11. Objetivos del Desarrollo Sostenible alineados a los Sistemas Urbanos de Drenaje Pluvial

OBJETIVOS DESARROLLO SOSTENIBLE	META ASOCIADA PARA EL 2030
Objetivo 1: Poner fin a la pobreza en todas sus formas en todo el mundo.	1.5. Fomentar la <u>resiliencia</u> de los pobres y las personas que se encuentran en <u>situaciones vulnerables</u> y reducir su exposición y vulnerabilidad a los <u>fenómenos extremos</u> relacionados con el clima y otras crisis y desastres económicos, sociales y ambientales.
Objetivo 3: Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades	3.9. <u>Reducir</u> considerablemente el número de <u>muer</u> tes y <u>enfermedades</u> causadas por productos químicos peligrosos y por la <u>polución y contaminación del aire, el agua y el suelo</u> . 3.13. Reforzar la capacidad de todos los países, en particular los países en desarrollo, en materia de alerta temprana, <u>reducción de riesgos</u> y gestión de los riesgos para la salud nacional y mundial.
Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos.	6.3. Mejorar la calidad del agua <u>reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento</u> y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, <u>reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar</u> y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial.
Objetivo 8: Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos.	1.1. Mejorar progresivamente la producción y el consumo eficientes de los recursos mundiales y procurar desvincular el crecimiento económico de la <u>degradación del medio ambiente</u> , conforme al Marco Decenal de Programas sobre modalidades de Consumo y Producción Sostenibles, empezando por los países desarrollados. 1.2. Lograr el <u>empleo pleno y productivo</u> y el trabajo decente para todas las mujeres y los hombres, incluidos los jóvenes y las personas con discapacidad, así como la igualdad de remuneración por trabajo de igual valor.

Fuente: Adaptado de PNUD

Tabla 11. (Continuación)

OBJETIVOS DESARROLLO SOSTENIBLE	META ASOCIADA PARA EL 2030
Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación.	9.1. Desarrollar <u>infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad</u> , incluidas infraestructuras regionales y transfronterizas, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo hincapié en el acceso asequible y equitativo para todos.
Objetivo 11: Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.	11.5. “Reducir significativamente el número de muertes causadas por <u>los desastres</u> , incluidos los relacionados con <u>el agua</u> , y de personas afectadas por ellos, y reducir considerablemente las pérdidas económicas directas provocadas por los desastres en comparación con el producto interno bruto mundial, haciendo hincapié en la protección de los pobres y las personas en situaciones de vulnerabilidad. 11.7. Proporcionar <u>acceso a zonas verdes</u> y espacios públicos seguros, inclusivos y accesibles, en particular para las mujeres y los niños, las personas de edad y las personas con discapacidad.
Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.	13.1. Fortalecer la <u>resiliencia</u> y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y <u>los desastres naturales</u> en todos los países. 13.2. Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales
Objetivo 15: Proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, efectuar una ordenación sostenible de los bosques, luchar contra la desertificación, detener y revertir la degradación de las tierras y poner freno a la pérdida de diversidad biológica.	15.3. Para 2030, <u>luchar contra</u> la desertificación, rehabilitar las tierras y los <u>suelos degradados</u> , incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y <u>las inundaciones</u> , y procurar lograr un mundo con una degradación neutra del suelo. 15.5. Adoptar medidas urgentes y significativas para <u>reducir la degradación</u> de los hábitats naturales, detener la pérdida de la diversidad biológica y, para 2020, proteger las especies amenazadas y evitar su extinción. 15.9. Para 2020, <u>integrar los valores de los ecosistemas</u> y la diversidad biológica <u>en la planificación nacional y local</u> , los procesos de desarrollo, las estrategias de reducción de la pobreza y la contabilidad.

Fuente: Adaptado de PNUD

De acuerdo con la Tabla 11, se señaló el nivel de importancia de cada uno de los ODS para cada uno de los sistemas de drenaje, tanto convencional como sostenible; con la finalidad de establecer las categorías para la identificación de los impactos sociales. Asimismo, es importante considerar La Declaración universal de los Derechos Humanos, ya que establece los derechos que poseen todas las personas sin distinción alguna. Considerando el propósito del trabajo enmarcado en el área de la sostenibilidad, donde se busca un balance entre lo económico, ambiental y social. Vale la pena enmarcar el artículo 25 de esta declaración, el cual dice:

“Toda persona tiene derecho a un nivel de vida adecuado que le asegure, así como a su familia, la salud y el bienestar, y en especial la alimentación, el vestido, la vivienda, la asistencia médica y los servicios sociales necesarios; ...”.

Lo anterior se relaciona con el trabajo, puesto que implementar sistemas de drenaje urbano que generen bajo impacto a nivel económico, social y ambiental mejora notablemente la calidad de vida de las personas, debido a que se garantiza el bienestar y la salud por la adecuada gestión del recurso hídrico y prevención del riesgo de inundación. Además, se considera la implementación de infraestructuras que garanticen un nivel vida adecuado para todas las personas.

7.3.2 Matriz de Leopold

Para identificar los potenciales impactos asociados a los sistemas de drenaje urbano pluvial en el conjunto de VIS Fraccionamiento Rancho Bellavista se empleó la matriz de Leopold. Para ello, se realizó una revisión exhaustiva de la variedad de interacciones entre los elementos del proyecto (acciones y/o actividades) y las diferentes categorías de impacto a evaluar, para identificar factores importantes, necesidades de datos y alternativas menos dañinas (Leopold *et al.*, 1971). Las categorías de impacto se tomaron con base a la alineación de los ODS con los sistemas de drenaje urbano pluvial tanto convencional como sostenible, siendo estos específicos para el área de estudio. La matriz se desarrolló en los siguientes pasos (Leopold *et al.*, 1971):

- I. Identificación de acciones del proyecto en las etapas que comprende todo el ciclo de vida de los sistemas de drenaje urbano pluvial. En la Tabla 12 se describen de manera general las acciones realizadas durante el ciclo de vida de cada uno de los sistemas de drenaje a evaluar, con base a los diseños de cada sistema (Ver Anexo 2 y 3).

Tabla 12. Acciones realizadas durante el ciclo de vida de los Sistemas Urbanos de Drenaje

SISTEMA DE DRENAJE CONVENCIONAL		
ETAPA DE CONSTRUCCIÓN		
Actividad	Caracterización	Abrev.
Movilización de materiales, maquinaria y equipos.	Transporte de materiales, maquinaria y equipos para la obra.	A.1
Preparación del terreno (<i>desmonte-descapote</i>).	Excavación (<i>Retiro de la cobertura vegetal y de la capa orgánica del suelo</i>).	A.2
Obras civiles.	Construcción de la infraestructura (<i>Colocación de tubería, pozos de visita, terminación</i>).	A.3
ETAPA DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO		
Uso de la infraestructura.	Operación de los usos previstos dentro del plan (<i>evacuación del agua de lluvia</i>).	A.4
Mantenimiento.	Limpieza y revisión (<i>coladeras, tuberías, pozos de visitas y demás elementos complementarios</i>).	A.5
ETAPA DE DESMANTELAMIENTO		
Preparación del terreno (<i>desmonte</i>).	Excavación del terreno.	A.6
Obras civiles.	Desmantelamiento de la infraestructura perteneciente al drenaje convencional.	A.7
Movilización de residuos (<i>disposición final</i>).	Trasporte de residuos.	A.8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. (Continuación)

SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE		
ETAPA DE CONSTRUCCIÓN		
Actividad	Caracterización	Abrev.
Movilización de materiales, maquinaria y equipos.	Transporte de materiales, maquinaria y equipos de la obra (<i>SUDS</i>).	B.1
Preparación del terreno (desmante-descapote).	Excavación (<i>Retiro de la cobertura vegetal y de la capa orgánica del suelo</i>).	B.2
Obras civiles.	Construcción de la infraestructura (<i>pavimentos permeables y área de biorretención</i>).	B.3
ETAPA DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO		
Uso de la infraestructura.	Operación de los usos previstos dentro del plan (<i>captación de agua de lluvia</i>).	B.4
Mantenimiento.	Limpieza, aspirado, poda de maleza y adición de agua.	B.5
ETAPA DE DESMANTELAMIENTO		
Preparación del terreno (desmante-descapote).	Retiro de la cobertura y excavación del terreno	B.6
Obras civiles.	Desmantelamiento de la infraestructura perteneciente al <i>SUDS</i> .	B.7
Movilización de residuos (<i>disposición final</i>).	Trasporte de residuos.	B.8

Fuente: Elaboración propia

- II. Identificación de las categorías de impacto para valorar los efectos sociales generados por cada etapa a evaluar. Estas categorías se establecieron de acuerdo a los ODS alineados al área de estudio (Fraccionamiento Rancho Bellavista). La Tabla 13 muestra la relación entre las categorías de impacto y los ODS.

Tabla 13. Categorías de impacto social para la matriz de Leopold

CATEGORÍA DE IMPACTO	ABREV.	DESCRIPCIÓN	ODS
Modificaciones culturales	MC	Cambio de la dinámica sociocultural.	1, 11
Recreación y Espacios abiertos	REA	Inclusión social y uso multifuncional. Áreas verdes.	3, 11, 13
Salud y Seguridad	SS	Lugares que ofrezcan bienestar y salud.	3, 11.
Calidad Estética y Visual	CEV	Vistas escénicas y panorámicas, calidad visual.	15
Generación de empleo	GE	Crecimiento económico por nuevos trabajos para la comunidad.	8
Generación de servicios públicos	GSP	Implementación de infraestructuras para la gestión del agua pluvial.	6, 9

Fuente: Elaboración propia

- III. Estimación subjetiva de la magnitud (M) e importancia (I) del impacto de cada celda de la matriz (producto de la intersección de filas y columnas) (Ver Figura 11).

- a) **Magnitud:** Se encuentra medido en una escala de 1 a 10, en donde 10 corresponde a la alteración máxima provocada en el factor social y 1 a la mínima. El valor se encuentra precedido del signo + o -, si el impacto es positivo o negativo.
- b) **Importancia:** Representa la incidencia del impacto medido en una escala ascendente de 1 a 10. La suma de los valores que arrojen las filas indicará las incidencias del conjunto sobre cada categoría de impacto social, mientras que la suma de los valores de las columnas arrojará una valoración relativa del efecto que cada acción producirá al medio.

En la Tabla 14 se describen los atributos de calificación con sus respectivos valores de magnitud e importancia del impacto en la matriz de Leopold. La magnitud se expresa en términos de intensidad y afectación, es decir, el grado de impacto que se genera hacia la población. Por su parte, la importancia se menciona en términos de duración e influencia, en otras palabras, la relación de espacio y tiempo.

Tabla 14. Calificación de la magnitud e importancia del impacto social en la matriz de Leopold

IMPACTOS NEGATIVOS						
MAGNITUD			IMPORTANCIA			
Intensidad	Afectación	Calificación		Duración	Influencia	Calificación
Baja	Baja	-1		Temporal	Puntual	1
Baja	Media	-2		Media	Puntual	2
Baja	Alta	-3		Permanente	Puntual	3
Media	Baja	-4		Temporal	Local	4
Media	Media	-5		Media	Local	5
Media	Alta	-6		Permanente	Local	6
Alta	Baja	-7		Temporal	Regional	7
Alta	Media	-8		Media	Regional	8
Alta	Alta	-9		Permanente	Regional	9
Muy alta	Alta	-10		Permanente	Nacional	10
IMPACTOS POSITIVOS						
MAGNITUD			IMPORTANCIA			
Intensidad	Afectación	Calificación		Duración	Influencia	Calificación
Baja	Baja	+1		Temporal	Puntual	1
Baja	Media	+2		Media	Puntual	2
Baja	Alta	+3		Permanente	Puntual	3
Media	Baja	+4		Temporal	Local	4
Media	Media	+5		Media	Local	5
Media	Alta	+6		Permanente	Local	6
Alta	Baja	+7		Temporal	Regional	7
Alta	Media	+8		Media	Regional	8
Alta	Alta	+9		Permanente	Regional	9
Muy alta	Alta	+10		Permanente	Nacional	10

Fuente: Adaptado de Ordoñez y Rueda, 2017

		Acciones					Impacto		
		a	b	c	d	e	-	+	P
Categorías	a	-2	1			8			
	b		7	8	-1	5			
	c	4	2	8	3				
Impacto	-								
	+								
	P								Total

+ : Positivo , - : Negativo, P : ponderación

Figura 11. Ejemplo de matriz Leopold
Fuente: Adaptado de Leopold et al, 1971

- IV. Sumatoria por separado de valores de la agregación de impactos tanto para las acciones como para las categorías sociales. Si el signo del valor es positivo, significa un beneficio social; si el signo es negativo, será perjudicial; de modo que, si es necesaria su ejecución, se tendrán que tomar medidas de corrección o mitigación para aquellas acciones con mayor deterioro.
- V. Ponderación de los valores para tener una estimación global de los impactos sociales para cada una de las categorías y acciones del proyecto.
- VI. Comparación de la matriz de Leopold de los sistemas urbanos de drenaje convencional frente a los sistemas urbanos de drenaje sostenible.

7.3.3 Perspectiva Institucional

Se realizaron entrevistas semiestructuradas a la Comisión Estatal de Aguas (CEA) para conocer su perspectiva como ente institucional de la ciudad Santiago de Querétaro sobre el funcionamiento e implementación de los sistemas de drenaje urbano pluvial en conjuntos de VIS. Para ello, se solicitó por medio de la Plataforma Nacional de Transparencia (PNT) un espacio para entrevistar a miembros de la Dirección Divisional de Hidráulica y Construcción, Dirección Divisional de Saneamiento y Dirección Divisional de Proyectos de Infraestructura, pertenecientes a la Dirección General Adjunta de Operación Técnica. Las entrevistas se realizaron en el mes de enero de 2019 de manera colectiva con un total de cinco actores, los cuales fueron asignados por la unidad de transparencia de la CEA.

Es importante señalar que esta herramienta de investigación permitió obtener información y adquirir conocimientos sobre el tema a tratar (Kvale, 2011); al ser una entrevista de tipo semiestructurada se presentó una mayor flexibilidad de diálogo entre el entrevistador y los entrevistados, debido a que las preguntas se pudieron adaptar con base a las respuestas; además, de aclarar términos, reducir formalismos e identificar ambigüedades (Kvale, 2011; Díaz et al., 2013). Es necesario mencionar, que, al realizarse de manera colectiva, las respuestas de

cada uno de los apartados de la entrevista pueden verse influenciados por las opiniones de los otros entrevistados.

En la Tabla 15 se contempla el guion que se tuvo como base para establecer un diálogo entre en el entrevistador y los actores institucionales. El guion contempla cuatro partes: en la primera se trata de manera general el concepto de los sistemas de drenaje pluvial, sus ventajas y actuales problemas; la segunda está relacionada con sistemas más sostenibles para la gestión del agua pluvial; la tercera hace referencia a la posibilidad de adopción de nuevas tecnologías; y, por último, se habla más a detalle de la zona de estudio, en este caso, el conjunto de VIS Fraccionamiento Rancho Bellavista.

Tabla 15. Guion de entrevista semiestructurada

GUIÓN DE ENTREVISTA CEA	
PARTE I	
1.	En general, ¿para usted qué son y cuáles son las funciones de un sistema de drenaje pluvial (<i>convencional</i>)?
2.	Desde su punto de vista, ¿Qué ventajas y desventajas considera usted que tienen estos sistemas de drenaje pluvial?
3.	Desde su experiencia, ¿Qué problemas se han evidenciado en la gestión del agua pluvial en Querétaro (<i>inundación, fugas, falta de infraestructura, etc.</i>)?
4.	¿Cómo se manejan estos problemas? ¿Cuál es el papel que desarrolla la CEA ante estos problemas (<i>inundación, fugas, desabastecimiento etc.</i>)?
5.	De acuerdo con su experiencia, ¿Cómo es el proceso de implementación (<i>diseño, licencia y construcción</i>) de los sistemas de drenaje pluvial en VIS?
6.	Desde su punto de vista, ¿Cuáles son las dificultades que se suelen presentar en el proceso de implementación de los sistemas de drenaje pluvial convencional?
7.	¿Por qué considera usted que se presentan estas dificultades?
8.	¿Existe seguimiento para verificar que el diseño que propone el CEA sea cumplido por el desarrollador asignado?
9.	¿Quién se encuentra a cargo de la operación y mantenimiento de los sistemas de drenaje (<i>el desarrollador o la CEA</i>)?
10.	¿Qué sucede cuando el sistema de drenaje cumple su ciclo de vida?
PARTE II	
11.	¿Tiene usted conocimiento de otras tecnologías o sistemas para tratar y/o manejar las aguas pluviales? ¿Cuáles? <i>--Breve introducción de los SUDS por parte del entrevistador. --</i>
12.	¿Ha escuchado acerca de los sistemas Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS)?
13.	¿Sabe usted si este tipo de sistemas se han implementado en la ciudad de Querétaro? ¿En qué parte?
14.	Con relación a lo anterior, ¿Qué ventajas y desventajas considera usted que tienen los SUDS?
PARTE III	
15.	En su opinión, ¿por qué cree que siguen implementado los mismos sistemas de drenaje pluvial convencional considerando/sabiendo que existen otras alternativas más sostenibles?
16.	¿Cómo cree usted que se podría cambiar este paradigma?
17.	¿Cuál considera usted el papel que debería desarrollar la CEA para implementar nuevas infraestructuras de drenaje pluvial (SUDS)?

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 15. (Continuación)

GUIÓN DE ENTREVISTA CEA	
PARTE IV	
18.	En esta última parte de la entrevista, quisiera saber si me puede orientar más sobre el área de estudio en la que estoy trabajando como es el Rancho Bellavista ¿Cree usted que se puede obtener información específica de este conjunto de VIS en particular? ¿Sabría usted quien me podría brindar información? ¿Sabe usted quién es el desarrollador del sistema de drenaje pluvial en el Fraccionamiento Rancho Bellavista?
19.	¿Sabe usted si en este conjunto de VIS se han presentado problemas asociados a la gestión del agua pluvial (inundaciones, fugas, etc.)?
20.	¿Cree usted que es eficiente el sistema de drenaje pluvial en los conjuntos de VIS?
21.	¿Cómo podríamos mejorar los sistemas de drenaje pluvias en este tipo de conjuntos?

Fuente: Elaboración Propia

7.3.4 Límites del Análisis social

Para el desarrollo del análisis social del presente estudio se consideraron los siguientes límites:

- a) **Límite espacial:** La identificación de los impactos sociales se realizaron para los dos sistemas de drenaje pluvial en el conjunto de VIS Fraccionamiento Rancho Bellavista en la delegación Felipe Carrillo Puerto de la ciudad Santiago de Querétaro.
- b) **Límite temporal:** Se consideraron como escenario todo el ciclo de vida de los sistemas urbanos de drenaje pluvial en sus etapas de construcción, operación, mantenimiento y desmantelamiento.
- c) **Límite por tipo de drenaje:** Se identifican los impactos de un sistema de drenaje urbano pluvial convencional (de tipo superficial longitudinal) y un tren de sistemas de drenaje urbano sostenible (pavimento permeable + área de biorretención).
- d) **Límite de información:** No toda la información se encuentra localizada para la escala que se desea; por tal motivo, se recopilaron los datos mediante información bibliográfica. Las entrevistas estuvieron condicionadas a la disponibilidad de tiempo y espacio por parte de los actores institucionales.
- e) **Límite de evaluación:** La evaluación de los impactos mediante la matriz de Leopold se realizó de manera subjetiva considerando los aspectos identificados en el ámbito ambiental y económico. Además de revisar bibliografía relacionada al estudio.
- f) **Límite de discusión de resultados:** Dado que no se encuentran estudios previos empleando la metodología de matriz de Leopold para la evaluación de impactos sociales de sistemas urbanos de drenaje pluvial, la discusión se centra en los impactos identificados para el área de estudio.

8 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación de los impactos ambientales, económicos y sociales de los sistemas urbanos de drenaje pluvial convencional frente a los sostenibles en un conjunto de vivienda de interés social, considerando su ciclo de vida se presenta en tres secciones según cada uno de los pilares de sostenibilidad, donde se compara y discute los resultados.

8.1 AMBITO AMBIENTAL

8.1.1 Inventario de Análisis Ciclo de Vida para sistemas Urbanos de Drenaje pluvial

En el desarrollo del inventario de ciclo de vida se consideraron las etapas de construcción, operación y desmantelamiento de cada una de las infraestructuras. Para ello, se obtuvo la información necesaria para llevar a cabo el proceso de asignación de entradas y salidas de cada uno de los sistemas. En los Anexos 2 y 3 se describen de manera detallada el diseño de cada uno de los sistemas urbano de drenaje pluvial, tanto convencional como sostenible.

8.1.1.1 Inventario Sistema Urbano de Drenaje Convencional

El sistema de drenaje convencional está diseñado para que las aguas pluviales escurran sobre las vialidades hasta ser captadas por coladeras de piso ubicadas en puntos bajos; luego, se conducirán a través de colectores hasta una estación de bombeo ubicado en la parte más baja del Fraccionamiento Rancho Bellavista para finalmente bombearse a un canal de riego (Beltrán, 2011) (Ver Figura 10).

Los parámetros que se consideran en el diseño del drenaje pluvial se observan en la Tabla 16 y los datos que conforman el inventario se presentan de manera global en la Tabla 17, donde se consideraron las especificaciones del Manual para instalaciones de agua potable, agua tratada, drenaje sanitario y drenaje pluvial de los fraccionamientos y condominios de las zonas urbanas del Estado de Querétaro descritas por la CEA de esta entidad.

Tabla 16. Parámetros para el sistema Urbano de Drenaje Convencional

PARÁMETRO	CARACTERÍSTICAS
Tipo de desarrollo	Habitacional VIS
Número de viviendas	1,188
Área del terreno	198,640.55 m ²
Intensidad de lluvia	82.42 mm/h
Coefficiente de escurrimiento	0.50
Gasto del proyecto	2,213.60 l/s
Tipo de drenaje	Superficial
Tipo de tubería	Polietileno de alta densidad
Coefficiente de rugosidad	0.009
Estructura receptora	Estación de bombeo

Fuente: Adaptado de Beltran (2011)

Tabla 17. Inventario de ciclo de vida para Sistemas Urbanos de Drenaje Convencional

PARÁMETRO	UNIDADES	CANTIDAD (UF)
CONSTRUCCIÓN		
Excavación	m ³	1.59106E-06
Plantilla o cama de arena	Ton	8.80947E-08
Relleno (Cemento-Arena "Mortero")	Ton	1.20648E-06
Tubería de polietileno de alta densidad (distintos diámetros)	Ton	8.30967E-07
Pozos de visita (Tipo: común, caja, especial)	Pieza	1.31015E-08
Registro pluvial	Pieza	6.96886E-09
Coladera pluvial de piso	Pieza	2.81542E-08
Brocal y tapa de Fo.Fo.	Pieza	1.31015E-08
Bombas 250 lps	Pieza	1.11502E-09
Camión	tkm	1.12592E-05
Combustible (Diésel)	Veh- Km/ L	1.34895E-10
OPERACIÓN		
Consumo de energía	Kwh	0.023156E+00
DESMANTELAMIENTO		
Excavación	m ³	1.59106E-06
Disposición de pozos de visita y accesorios	Pieza	6.13259E-08
Disposición de relleno	m ³	1.20648E-06
Disposición de tubería	Pieza	8.30967E-07
Disposición de bombas	Pieza	1.59106E-06
Combustible (Diésel)	Veh- Km/ L	2,643213E-05

* Distancia desde el proveedor de materiales al fraccionamiento 7.5 km
 *Distancia desde el fraccionamiento hasta el relleno sanitario: 14.2 km

8.1.1.2 Inventario Sistema Urbano de Drenaje Sostenible

El sistema de drenaje sostenible está diseñado para que las aguas pluviales se infiltren sobre las aceras hechas de pavimento permeable junto a la Avenida Bellavista, Avenida Vista Hermosa y Avenida Vista Alegre. Además, se cuenta con el área de biorretención ubicado en el centro del fraccionamiento, el cual permitirá captar e infiltrar la lluvia mediante elementos ajardinados (Ver Figura 11). En la Tabla 18 se presentan los valores globales del inventario de ACV para este sistema de drenaje.

Tabla 18. Parámetros para el Sistema Urbano de Drenaje Sostenible

PARÁMETRO	CARACTERÍSTICAS
Tipo de desarrollo	Habitacional VIS
Número de viviendas	1,188.00
Área del terreno	19,8640.55 m ²
Intensidad de lluvia	82.42 mm/h

Tabla 18. (Continuación)

PARÁMETRO	CARACTERÍSTICAS
Tipo de drenaje	Pavimento permeable (infiltración completa) + Área de biorretención
Especies para la cobertura vegetal (Nativas del Estado de Querétaro)	<i>Forestiera Phillyreoides, Acacia Schaffneri, Eysenhardtia Polystachya, Senna Polyanrha, Erithrina Coralloides, Ceiba Aesculifolia, Salvia Sp,</i>

Tabla 19. Inventario de ciclo de vida para el Sistema Urbano de Drenaje Sostenible

PARÁMETRO	UNIDADES	CANTIDAD (UF)
CONSTRUCCIÓN		
Excavación	m ³	2.980045E-06
Arena	Ton	7.011784E-07
Grava	Ton	2.103535E-06
Concreto permeable	Ton	7.011775E-07
Piedra	Ton	6.037692E-12
PARÁMETRO	UNIDADES	CANTIDAD (UF)
CONSTRUCCIÓN		
Césped	Ton	4.417824E-12
Corteza	Ton	2.562338E-12
Plantas	Ton	8.835647E-11
Geotextil	Ton	1.752946E-07
Combustible	Veh- Km/ L	2,724152E-05
OPERACIÓN		
Secuestro de carbono	Ton	0.097000E+00
DESMANTELAMIENTO		
Excavación	m ³	2.980045E-06
Combustible (Diésel)	Veh- Km/ L	5,337866E-05
Disposición Final (Relleno sanitario)	Ton	3.681287E-06
* Distancia desde el proveedor de materiales al fraccionamiento 7.5 km		
*Distancia desde el fraccionamiento hasta el relleno sanitario: 14.2 km		

8.1.2 Evaluación del impacto ambiental

Los impactos ambientales descritos a continuación se encuentran referidos a la unidad funcional, la cual corresponde a la captación de 1 m³ de agua pluvial en el área de vivienda de interés social Fraccionamiento Rancho Bellavista en la delegación Felipe Carrillo. Los resultados totales por categoría se muestran en la Tabla 20. Las categorías evaluadas fueron Cambio climático, Agotamiento de la capa de ozono, Toxicidad humana, Acidificación terrestre, Eutrofización de agua dulce y Ocupación del suelo urbano; las cuales fueron modeladas mediante SimaPro y el método ReCiPe de punto medio.

Tabla 20. Impactos ambientales globales para el Sistema Urbano de Drenaje Convencional frente a los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

CATEGORÍA DE IMPACTO	UNIDADES	SISTEMA DE DRENAJE URBANO	
		CONVENCIONAL	SOSTENIBLE
Cambio climático	Kg CO ₂ eq	5.12E+02	2.56E+02
Agotamiento de la capa de ozono	Kg CFC – 11 eq	5.86E-05	9.49E-06
Toxicidad humana	Kg 1.4 – DB eq	3.62E+00	8.70E-01
Acidificación terrestre	Kg SO ₂ eq	7.72E-01	1.50E-01
Eutrofización de agua dulce	Kg P eq	5.55E-08	2.01E-08
Ocupación del suelo urbano	m ³	1.67E+01	1.26E+01

Fuente: Datos obtenidos en *SimaPro*

8.1.2.1 Cambio climático

Los resultados globales de cambio climático se presentan en la Figura 12, en la cual se observa que ambos sistemas de drenaje pluvial generan un gran impacto en esta categoría, lo que se debe principalmente a las emisiones de GEI generadas en la etapa de construcción. Lo anterior es referente a los procesos de relleno, en el cual se emplea como insumo la arena, el mortero, cemento y el mantillo de corteza; y el proceso de transporte; debido a la quema de combustible Diésel en el motor del vehículo empleado para el traslado de los materiales desde el centro de venta hasta el Fraccionamiento (7.5 km), aumentado de esta manera las emisiones de GEI al ambiente.

Por otra parte, la etapa de operación en el caso del SUDS evita los impactos de cambio climático, gracias a los elementos ajardinados que lo componen, ya que contribuye significativamente a la disminución de GEI por el secuestro de carbono que se lleva a cabo durante el proceso de fotosíntesis. Adicionalmente, los SUDS puede reemplazar parte del enfriamiento evaporativo perdido a través de la urbanización y, por lo tanto, puede proporcionar adaptación y mitigación del cambio climático contra los efectos de la isla de calor urbano.

Los resultados obtenidos coinciden con los estudios realizados por Flynn y Traver (2013), Wang *et al.*, (2013) y O'Sullivan *et al.*, (2015), en los cuales se evidencia una alta generación de kg CO₂ equivalente en la etapa de construcción, tanto en la infraestructura convencional como sostenible por la producción de los materiales e insumos empleados, tales como concreto, cemento, arena y mantillo de corteza. No obstante, señalan la reducción del potencial de calentamiento global en la fase de operación del SUDS por el secuestro de carbono gracias a la vegetación, tal es el caso de los jardines de lluvia. Vale la pena resaltar que gracias a las especies vegetales que componen el área de biorretención en el tren de SUDS no solo se puede interceptar el agua pluvial y almacenar el carbono, sino también ayudar a regular el clima, revirtiendo los impactos negativos al medio ambiente y a la salud humana por el cambio climático, como lo menciona Charlesworth (2010).

En los trabajos realizados por Vineyard *et al.*, (2015) y Wang *et al.*, (2013) se menciona que los procesos de transporte y operación contribuyen a la emisión de CO₂ y quema de combustible diésel en sus motores. Sin embargo, para el caso de los SUDS, estas emisiones se pueden

compensar hasta un 60% con el secuestro de carbono realizado por las plantas del jardín.

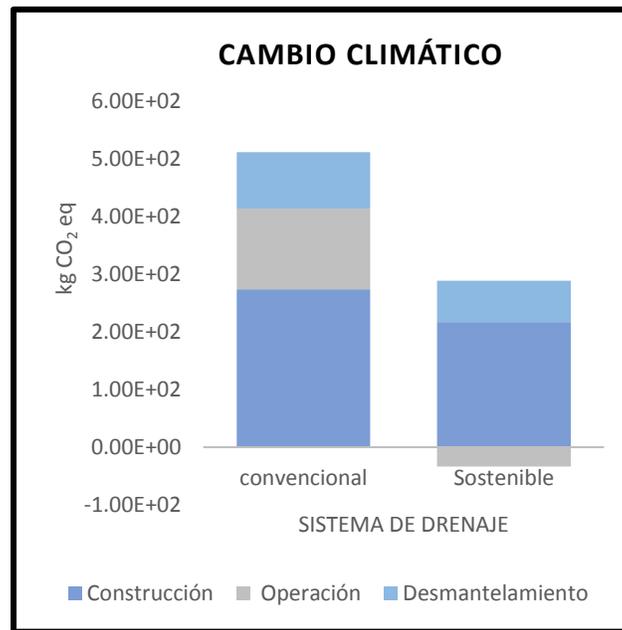


Figura 12. Contribución a la categoría de cambio climático

8.1.2.2 Agotamiento de la capa de ozono

En la Figura 13 se observa que el sistema convencional genera mayor impacto sobre la capa de ozono en relación con el sistema de drenaje sostenible. La etapa de operación del primero genera la disminución de la capa de ozono principalmente por los requerimientos de electricidad en la estación de bombeo, cuya generación produce CFC. Asimismo, el proceso de transporte en la etapa de construcción y desmantelamiento tanto para el SUDS como para el convencional genera impacto en esta categoría, debido al combustible empleado para el traslado de materiales y residuos; ya que el diésel genera emisiones de sulfatos y óxidos de azufre, que se ligan a la formación de compuestos aromáticos pesados. La etapa de operación en el SUDS evita impactos negativos sobre la capa de ozono, gracias a capacidad de reproducir de la manera más fiel el ciclo hidrológico, pudiendo desarrollar procesos de infiltración en el suelo, y, por ende, no requiriendo de elementos externos para llevar a cabalidad su principal función. Caso contrario ocurre en el sistema de drenaje convencional.

De acuerdo con Vineyard *et al.*, (2015), se concuerda que los procesos de transporte y operación contribuyen al agotamiento de la capa de ozono, debido al incremento de las emisiones de CFC por la quema de combustible. Por otra parte, Petit-Boix *et al.*, (2014), señala la construcción de sistemas de drenaje convencional con elementos como tuberías HDPE, pozos de visita y brocales entre otros, afectan esta categoría, debido a la composición de estos materiales. Asimismo, Flynn y Traver (2013) observan que los procesos de excavación, disposición de residuos en la etapa de desmantelamiento y el uso de arena silica durante la implementación son los mayores contribuyentes en el agotamiento de la capa de ozono en el caso de los SUDS.

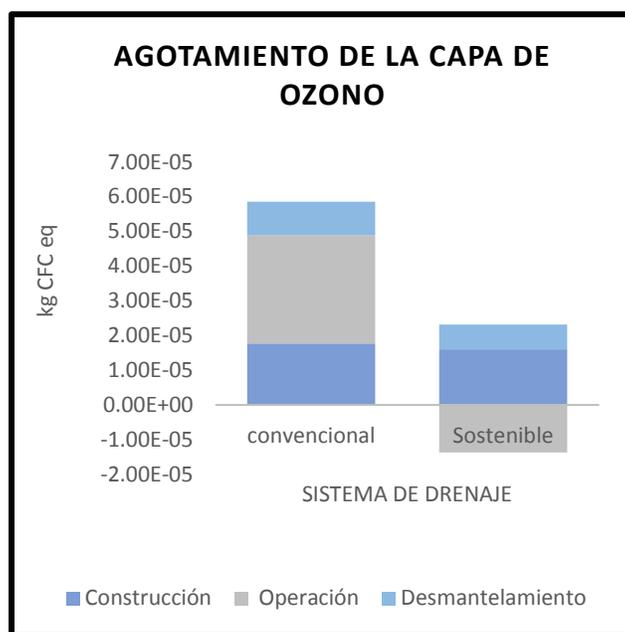


Figura 13. Contribución a la categoría de Agotamiento de la capa de ozono

8.1.2.3 Acidificación terrestre

Los contaminantes que generan acidificación tienen una amplia variedad de impactos en el suelo, en las aguas superficiales, aguas subterráneas, organismos vivos y en las infraestructuras. Muchas de las emisiones acidificantes son generadas por el hombre y otras son compuestos ácidos que se han formado a partir de reacciones en el aire. El SO_2 es un compuesto con alto potencial de acidificación.

En la Figura 14 se muestran los resultados globales de esta categoría, en donde el sistema convencional presenta mayor impacto. Los principales procesos que afectan el suelo son la excavación y relleno en las etapas de construcción y desmantelamiento tanto en el SUDS como en el convencional, debido a que se genera una alteración en el estado del suelo ocasionando cambios en su composición química y biológica. Por otra parte, las emisiones de SO_2 se encuentran también relacionadas por la quema de combustibles fósiles durante el transporte de materiales y residuos; debido a que el diésel genera emisiones de sulfatos y óxidos de azufre, principales componentes de la lluvia ácida.

Los resultados obtenidos en esta categoría, coinciden con los resultados encontrados en el trabajo de Hengen *et al.*, (2016), en donde las tendencias de acidificación terrestre son mayores en los sistemas convencionales a comparación de las infraestructuras verdes, tales como pavimentos permeables y áreas de biorretención. Además, indica el transporte como el proceso de mayor contribución de kg de SO_2 eq. Asimismo, Flynn y Traver (2013) resaltan la etapa de construcción como la más significativa en esta categoría, específicamente los procesos de relleno y cubrimiento.

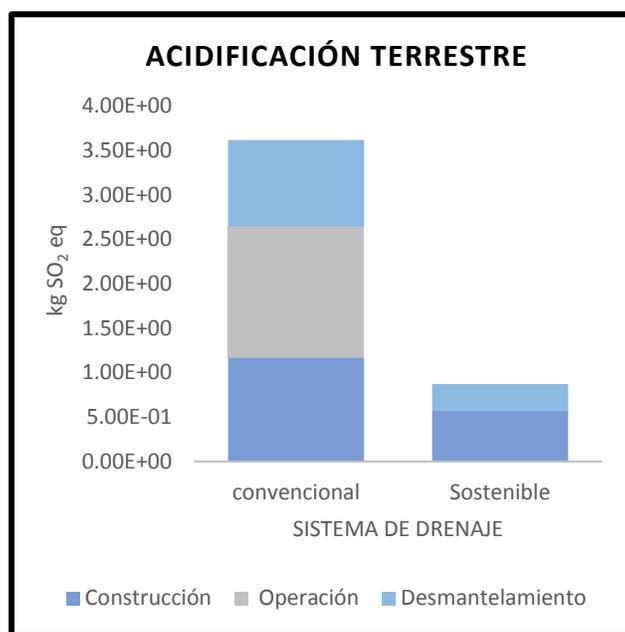


Figura 14. Contribución a la categoría de Acidificación terrestre

8.1.2.4 Toxicidad humana

El impacto de esta categoría se ve atribuido a los efectos adversos sobre la salud humana por la absorción de sustancias tóxicas. El uso de materiales como el cemento y tuberías de polietileno en sus procesos de extracción y fabricación en la etapa de construcción contribuyen significativamente en esta categoría, debido a que pueden liberar sustancias cancerígenas como el cloruro de vinilo, el cromo y las dioxinas (Brandt *et al.*, 2012; García, 2015). Adicionalmente, la quema de combustibles fósiles en los procesos de transporte de materiales y residuos afecta la salud pública, por las emisiones generadas en el aire de material particulado (PM), dióxido de azufre (SO₂) y óxido de nitrógeno (NO_x) provocando y exacerbando enfermedades. De igual manera, la generación de residuos en los procesos de excavación e instalación en las etapas de construcción y desmantelamiento tiene repercusiones sobre la población.

En la Figura 15 se evidencia que el sistema convencional genera mayores efectos adversos sobre la salud humana, principalmente por su etapa de construcción, seguido de la etapa de desmantelamiento y operación. En el caso de los SUDS, el impacto disminuye gracias a su capacidad de captura de carbono en la fase operación y a los servicios ambientales que este provee; así como, lo menciona Charlesworth (2010) se ha encontrado que el uso de áreas ajardinadas puede revertir los impactos negativos en la salud humana debido al cambio climático.

En los estudios realizados por O'Sullivan *et al.*, (2014), Phillips *et al.*, (2018) y Petit-Boix *et al.*, (2014) se demuestra que el uso de materiales en la etapa de construcción como concreto, tubos de polietileno o acero por los procesos de manufactura, además de la quema de combustible durante el transporte, incrementa las concentraciones de diclorobenceno equivalente.

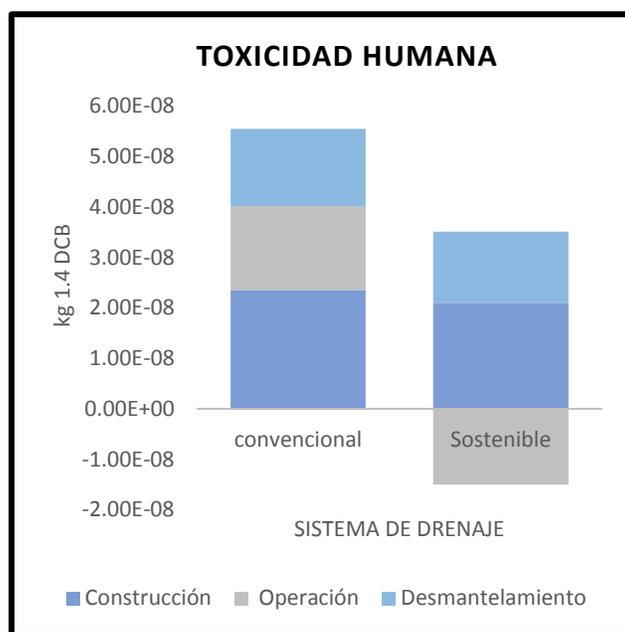


Figura 15. Contribución a la categoría de Toxicidad humana

8.1.2.5 Eutrofización de agua dulce

La calidad del recurso hídrico en cuerpos de agua dulce puede verse afectada por el incremento de nutrientes como el fósforo (P) y nitrógeno (N), dando paso a un cambio indeseable en el funcionamiento de los ecosistemas y composición de las especies. El aumento en las concentraciones de estos nutrientes puede ser ocasionado por actividades humanas como con el vertido continuo de detergentes, pesticidas, fertilizantes y aguas residuales producto de procesos urbanos e industriales.

La Figura 16 muestra que el sistema de drenaje convencional contribuye en gran medida a la eutrofización del agua en comparación con los SUDS; principalmente por la extracción y manufactura de los insumos y materiales empleados en la etapa de construcción, ya que, tiene gran potencial para causar impactos sobre los cuerpos de agua; la etapa de operación también incide en esta categoría dada a la generación de energía empleada para el bombeo del agua. En el caso de los SUDS, el potencial de eutrofización de agua dulce se ve reducido gracias a su etapa de operación, debido a que estos sistemas permiten la disminución total o parcial de elementos contaminantes como el nitrógeno y el fósforo. Esto evita los impactos ambientales del uso de energía en la estación de bombeo empleada en la etapa de operación del sistema convencional. No obstante, la etapa de construcción contribuye en esta categoría, debido a los procesos de extracción y manufactura de los materiales empleados.

Los resultados obtenidos concuerdan con Flynn y Traves (2013), Wang *et al.*, (2013) y Vineyard *et al.*, (2015), en los que el potencial de eutrofización se ve reducido en áreas de biorretención o jardines de lluvia por la eliminación de nitrógeno de efluentes, puesto que logran interceptar la contaminación de nutrientes antes de que pueda llegar a cuerpos receptores. No obstante, para el caso de la infraestructura convencional, se presenta un mayor impacto en la eutrofización en relación con los SUDS, debido a que su implementación se encuentra ligada con procesos de impermeabilización del suelo.

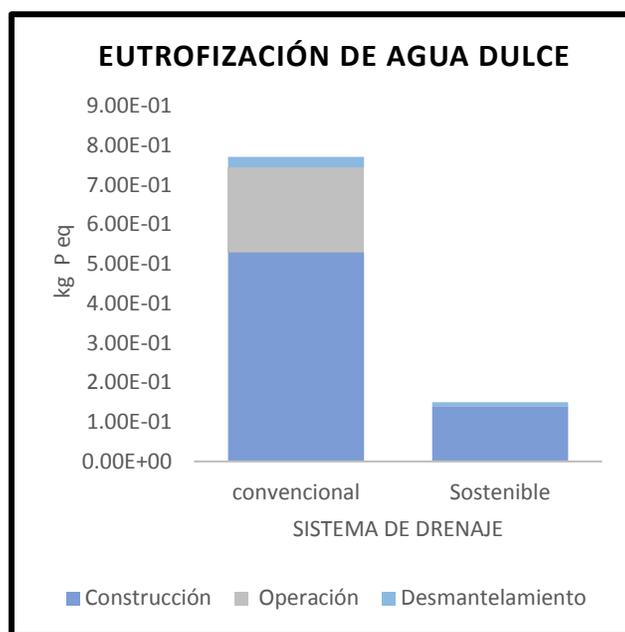


Figura 16. Contribución a la categoría de Eutrofización de agua dulce

8.1.2.6 Uso del suelo

Esta categoría se ve impactada por ambos sistemas de drenaje pluvial (Ver Figura 17), debido al espacio requerido en las etapas de construcción y desmantelamiento para llevar a cabo los procesos de excavación, relleno, instalación y desmontaje de las infraestructuras. La etapa de construcción, seguida de la etapa de desmantelamiento, generan mayor impacto sobre el suelo, debido a los procesos que se desarrollan en estos, como extracción de materias primas, excavación y disposición de residuos en el relleno. Esto se debe principalmente al cambio en el uso del suelo y la extracción de los recursos naturales provenientes del mismo.

Vale la pena mencionar la investigación desarrollada por Mattila *et al.*, (2011), en donde se aborda la importancia del uso del suelo en aquellas áreas destinadas a propósitos socioeconómicos, siendo modificadas por las distintas actividades humanas para obtener productos o beneficios mediante la utilización de los recursos de la tierra. En otras palabras, el cambio en el uso del suelo por la implementación de los sistemas de drenaje pluvial se evidencia con la transformación de la tierra que es causada directamente por la expansión de esta actividad.

Por su parte, Phillips *et al.*, (2018) mencionan la relación directa que tiene el uso del uso con los impactos asociados en el ciclo de vida de las aguas pluviales entorno urbano. Algunas de las actividades que influyen en esta categoría y que concuerda con los resultados del presente trabajo son instalación de la infraestructura, impermeabilización del suelo, excavación y recubrimiento del suelo.

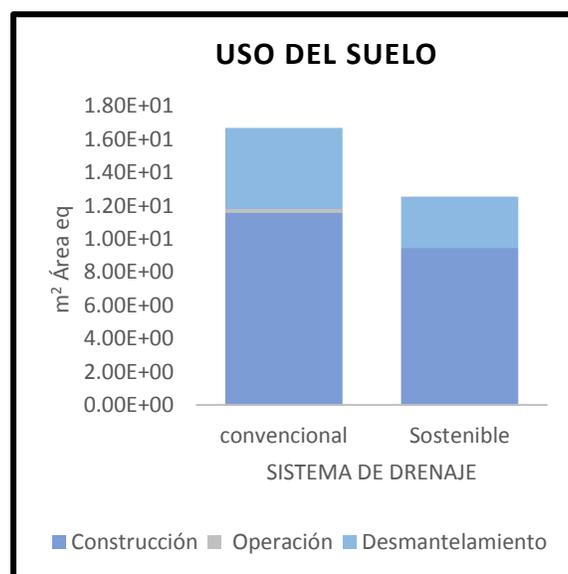


Figura 17. Contribución a la categoría de Uso de suelo

8.2 AMBITO ECONÓMICO

Los costes para llevar a cabo las etapas de construcción, operación y desmantelamiento de los sistemas de drenaje pluvial convencional y sostenible se muestran en la Tabla 21 y 22. Para ello, se tomó como referencia el Catálogo general de precios unitarios para la construcción de sistemas de agua potable y alcantarillado de CONAGUA (2017), cuyos valores incluyen material, maquinaria, herramienta, limpieza y mano de obra necesaria para desarrollar la actividad. En la Tabla 23 se evidencia el valor presente neto de cada una de las etapas y el global considerando la vida útil de las infraestructuras.

Tabla 21. Costos de los Sistemas Urbanos de Drenaje Convencional

SISTEMA DE DRENAJE CONVENCIONAL					
ETAPA DE CONSTRUCCIÓN					
Concepto	Unidad	Cantidad	Valor Unitario		Valor Total
Excavación por medios mecánicos (0,00-2,00; 2,01-4,00 m)	m ³	5,707.74	\$ 68.04	\$	388,354.63
Plantilla o cama de arena	m ³	316.03	\$ 490.00	\$	154,854.70
Relleno	m ³	4,328.10	\$ 92.50	\$	400,349.25
Instalación de tubería polietileno de alta densidad 30 cm	m	1,320.00	\$ 432.00	\$	570,240.00
Instalación de tubería polietileno de alta densidad 45 cm	m	984.00	\$ 1,421.00	\$	1,398,264.00
Instalación de tubería polietileno de alta densidad 52,5 cm	m	97.00	\$ 1,950.75	\$	189,222.75

Fuente: Elaboración propia a partir del Catálogo de Precios unitarios para la construcción de sistemas de agua potable y alcantarillado de CONAGUA (2017)

Tabla 21. (Continuación)

SISTEMA DE DRENAJE CONVENCIONAL				
ETAPA DE CONSTRUCCIÓN				
Concepto	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Instalación de tubería polietileno de alta densidad 60 cm	m	227.00	\$ 1,950.75	\$ 442,820.25
Instalación de tubería polietileno de alta densidad 75 cm	m	187.00	\$ 2,364.26	\$ 442,116.62
Instalación de tubería polietileno de alta densidad 90 cm	m	166.00	\$ 3,381.97	\$ 561,407.02
Instalación de pozo de visita	Pieza	47.00	\$ 6,749.79	\$ 317,240.13
Instalación de registro pluvial	Pieza	25.00	\$ 415.61	\$ 10,390.25
Instalación de coladera pluvial de piso, con brocal y tapa fo.fo	Pieza	101.00	\$ 219.79	\$ 22,198.79
Montaje y conexión de bomba 250 lps	Pieza	4.00	\$ 414.65	\$ 1,658.60
Total				\$ 4,899,116.99
ETAPA DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO				
Bombeo para desagüe	hora	31.82	\$ 48.04	\$ 1,528.63
Sondeo de ductos	m	10,448.00	\$ 4.49	\$ 46,911.52
Limpieza y desenzolve de la red de drenaje en tubo de 30 cm	m	1,320.00	\$ 60.70	\$ 80,124.00
Limpieza y desenzolve de la red de drenaje en tubo de 45 cm	m	1,081.00	\$ 75.86	\$ 82,004.66
Limpieza y desenzolve de la red de drenaje en tubo de 60 cm	m	580.00	\$ 86.70	\$ 50,286.00
Total				\$ 431,008.79
ETAPA DE DESMANTELAMIENTO				
Demolición de pavimento con medios mecánicos	m ³	1,900.00	\$ 148.78	\$ 282,682.00
Desmantelamiento de tubos	m	2,981.00	\$ 16.77	\$ 49,979.45
Acarreo en camión de material producto de demolición (<i>Transporte al relleno</i>)	m ³ - km	5,707.74	\$ 7.78	\$ 44,406.22
Total				\$ 377,067.66

Fuente: Elaboración propia a partir del Catálogo de Precios unitarios para la construcción de sistemas de agua potable y alcantarillado de CONAGUA (2017)

Tabla 22. Costos de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

SISTEMA DE DRENAJE SOSTENIBLE				
ETAPA DE CONSTRUCCIÓN				
Concepto	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Excavación por medios mecánicos (0,00-2,00 m)	m ³	10,683.50	\$ 48.02	\$ 513,021.67
Plantilla o cama de grava	m ³	2,827.95	\$ 583.95	\$ 1,651,381.40

Tabla 22. (Continuación)

SISTEMA DE DRENAJE SOSTENIBLE				
ETAPA DE CONSTRUCCIÓN				
Concepto	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Plantilla o cama de arena	m ³	942.65	\$ 316.03	\$ 297,905.68
Colocación de pavimento concreto permeable	m ³	2,513.73	\$ 2,895.87	\$ 7,279,435.30
Plantación de especies vegetales y mantenimiento para adecuación	pieza	79.00	\$ 78.20	\$ 6,177.80
Total				\$ 9,747,921.85
ETAPA DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO				
Desyerbe y limpia realizada a mano	m ²	10,056.00	\$ 7.88	\$ 79,241.28
Poda de pasto y limpieza del área	m ²	3,352.00	\$ 8.69	\$ 29,128.88
Limpieza de agua a presión	m ³	37,706.00	\$ 4.73	\$ 178,349.38
Limpieza de pavimento	m ²	37,706.00	\$ 15.38	\$ 579,918.28
Total				\$ 866,637.82
ETAPA DE DESMANTELAMIENTO				
Demolición de pavimento con medios mecánicos	m ³	2,513.73	\$ 148.78	\$ 373,992.75
Desmonte por medios mecánicos en área vegetada	m ²	838.00	\$ 3.11	\$ 2,606.18
Acarreo en camión material producto de demolición (<i>Transporte al relleno</i>)	m ³ - km	2,513.73	\$ 7.78	\$ 19,556.82
Acarreo en camión material producto de la tala y desyerbe (<i>Transporte al relleno</i>)	m ³ - km	1,005.60	\$ 7.78	\$ 7,823.57
Total				\$ 403,979.32

Fuente: *Elaboración propia a partir del Catálogo de Precios unitarios para la construcción de sistemas de agua potable y alcantarillado de CONAGUA (2017)*

En la Tabla 23 se observa la estimación del VPN para cada una de las etapas del ciclo de vida de los sistemas de drenaje pluvial; evidenciando que la implementación del sistema de drenaje pluvial sostenible en el Fraccionamiento Rancho Bellavista resulta más costosa en relación con el drenaje convencional, con una diferencia total de 62.17%. Esto es debido primeramente a la etapa de construcción, que implica un elevado costo para la implementación del pavimento permeable, mayor volumen de excavación e integración de las distintas capas que se requieren para la implementación de los SUDS. Otro costo relevante es el del mantenimiento de la infraestructura, con una diferencia del 69.69%, ya que el sistema sostenible requiere mayor frecuencia de mantenimiento y mano de obra a comparación del sistema convencional. En cuanto a la etapa de desmantelamiento, los costos de ambos sistemas son similares; puesto que requieren de actividades semejantes, como la demolición de las infraestructuras, desmantelamiento de los elementos que la componen y el acarreo de los residuos al relleno sanitario. En este caso, la diferencia es del 6.66% en favor del sistema de drenaje convencional.

Tabla 23. Comparación del Valor Presente Neto de los Sistemas Urbanos de Drenaje Convencional frente a los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

ETAPA	SISTEMA DE DRENAJE URBANO	
	CONVENCIONAL	SOSTENIBLE
Construcción	\$ 4.899.116,99	\$ 9.747.921,85
Operación y mantenimiento	\$ 4.795.567,42	\$ 15.932.311,36
Desmantelamiento	\$ 23.121,85	\$ 24.772,07
VPN_{Total}	\$ 9.717.806,26	\$ 25.705.005,28

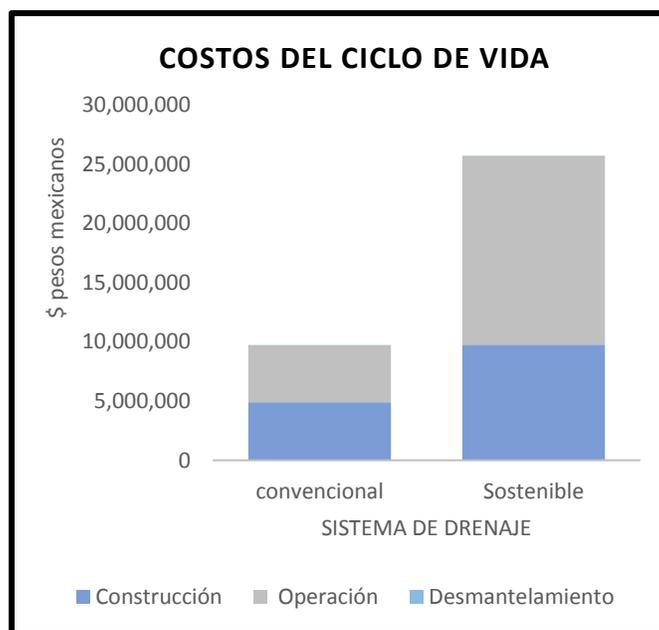


Figura 18. Comparación de la atribución de los costes en los Sistemas Urbanos de Drenaje

La Figura 18 muestra la contribución de costes para cada una de las etapas del ciclo de vida de los sistemas urbanos de drenaje pluvial. Para el sistema convencional la etapa de construcción es la que mayor aporta con un 50.26 %, seguida de la etapa de operación y desmantelamiento con un 49.35% y, por último, de la etapa de desmantelamiento con un 0.24%. Caso contrario se evidencia en los SUDS, debido a que la etapa de operación y mantenimiento es la que más contribuye a los costos con un 61.98%, seguida de la etapa de construcción y de la de desmantelamiento con unos valores de 37.92% y 0.10%, respectivamente. Lo anterior, se desprende por los valores obtenidos en el inventario de costes presentados en las Tablas 21 y 22.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo coinciden parcialmente con el estudio desarrollado por Vineyard *et al.*, (2015), en donde se muestra que los sistemas de drenaje convencional requieren una mayor inversión inicial con relación a los SUDS, pero los gastos de mantenimiento son relativamente menores. Todo lo contrario, a las infraestructuras verdes, que

requieren un mayor mantenimiento y uso de equipos. En cuanto al desmantelamiento del sistema, esta se considera la tarea más rápida y económica en ambas infraestructuras. Por su parte, aunque en este estudio no se han tomado en cuenta este tipo de consideraciones, Charlesworth (2010) señala que los trenes de SUDS con elementos ajardinados proporcionan los medios para regular el clima, interceptar las aguas pluviales y capturar el carbono, lo que puede provocar impactos económicos en el aumento de los precios de la vivienda al valorizar el suelo y la reducción de los costos de energía, en la medida que se disminuye el uso de elementos como de calefacción y/o aire acondicionado.

De acuerdo con el reporte realizado por Uda *et al.*, (2013), en el cual se comparan distintas tecnologías para la gestión del agua pluvial, los pavimentos permeables resultan más costosos en comparación con las áreas de biorretención, debido al mayor costo de sus materiales y proceso de instalación. Sin embargo, estos costos podrían verse compensados en cierta medida por una reducción en la necesidad de pavimentar el área de drenaje, ya que los pavimentos sirven como una superficie de estacionamiento y prácticas de tratamiento de aguas pluviales.

Un estudio elaborado por Tavakol *et al.*, (2016) reveló que los costos de ciclo de vida de una infraestructura gris (es decir, convencional) resultan más altos en comparación con los de un sistema sostenible o híbrido. Para ello, los autores emplearon simulaciones hidrológicas e hidráulicas continuas a largo plazo, así como técnicas de análisis del costo del ciclo de vida, mediante valor presente neto. Lo anterior, no concuerda con los resultados obtenidos en el presente trabajo, debido al tipo de infraestructuras, elementos y características empleadas para el modelo de análisis; ya que los autores, tomaron en cuenta adicionalmente los costos por honorarios de ingeniería, legales, administrativos e imprevistos durante el proyecto, además consideraron 75 años como el ciclo de vida de las instalaciones con reemplazo regular de sus componentes.

Por otra parte, el estudio realizado por Jeffer (2010) menciona la importancia de incluir una valoración de los beneficios y/o servicios ambientales que proveen los sistemas urbanos de drenaje pluvial, debido a que éstos últimos compensarían las diferencias de costos entre los sistemas urbanos de drenaje pluvial convencional y sostenible. Lo anterior, permitiría la toma de decisiones sobre la gestión efectiva del territorio promoviendo el desarrollo y la conservación; además de incorporar la dimensión social y política.

Vale la pena mencionar que el desarrollo de un sistema de drenaje pluvial de tipo convencional o sostenible depende en gran medida del presupuesto y del interés del órgano o ente encargado para llevar a cabo el proyecto. Para el caso de México, se cuentan con diversos programas presupuestarios con el fin de disminuir la brecha social de desigualdad y atender las necesidades básicas de la población. Para los sistemas de drenaje pluvial se asocia el Programa de agua potable, drenaje y tratamiento (PROAGUA) a cargo de CONAGUA, el cual se encuentra dentro del programa sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales, con la meta nacional de México Prospero¹. En esta iniciativa se busca fortalecer la gestión integrada y sustentable del agua, garantizando su acceso a la población y a los ecosistemas mediante el incremento de las

¹ México prospero: hace referencia a una de las metas nacionales del Plan Nacional de Desarrollo 2013 – 2018 para llevar al país a su máximo potencial, mediante propuestas y líneas de acción.

coberturas de los servicios de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas residuales (SHCP,2017).

8.3 AMBITO SOCIAL

Para identificar los impactos asociados al ámbito social referente a los sistemas de drenaje pluvial fue necesario conocer la situación sociodemográfica del Fraccionamiento Rancho Bellavista. Para ello, se toman los datos del Censo de Población y vivienda de 2010 realizado por INEGI.

La población en el fraccionamiento para ese año es de 1,705 habitantes, en donde el 51.7% corresponde al género femenino y el 58.3% al masculino. El 99.2% de las personas son nacidas en México, de las cuales solo el 46.9% son originarios de Querétaro. Además, el 42.2% son menores de 24 años y, de este valor, el 29.6% son niños entre 0 y 14 años. Por otra parte, para el año 2010 el total de viviendas ocupadas era del 48.2%, de las que el 99.3% disponían de drenaje. Sin embargo, no se especifica si el tipo de sistema es sanitario, pluvial o mixto y si está o no conectado a la red pública.

En relación con estos datos, hay un gran porcentaje de población infantil, quienes serían los más vulnerables en un evento de inundación. Esto es debido a que estos fenómenos amenazan su supervivencia, bienestar, desarrollo y salud física y emocional, pudiendo resultar heridos o, en el peor de los casos, ahogados. Asimismo, también podrían aumentar los riesgos por enfermedades tanto para adultos como para niños (Kousky, 2016). Por esta razón, es importante tener un buen sistema de drenaje pluvial para minimizar los impactos negativos hacia esta población.

Para los sistemas de drenaje convencional, el agua pluvial se considera una molestia, por lo que se pierde el valor del recurso hídrico. Por tanto, la población no es consciente de su importancia y no detecta la funcionalidad del drenaje, al tratarse de una red colectora que no considera el paisaje urbanístico y no se ve a simple vista. No obstante, el sistema puede generar empleo a largo plazo para su operación y mantenimiento, particularmente en la estación de bombeo y las redes colectoras.

Por otro lado, los sistemas de drenaje sostenible se caracterizan por proveer de servicios ambientales y sociales en el área de influencia. En este caso, para el conjunto de VIS Fraccionamiento Rancho Bellavista. Algunos de los beneficios que aporta son: mejoran la calidad de las aguas receptoras de escorrentías urbanas, favorecen los procesos naturales de depuración e impiden que las cargas contaminantes alcancen medios receptores como el dren El Arenal, localizado al oeste del terreno. A su vez, permiten la retención de los excesos de nutrientes que ocasionan la eutrofización de los cuerpos de aguas. Lo anterior ayuda a minimizar el riesgo a efectos adversos sobre la salud de los habitantes del fraccionamiento, debido a que evita la proliferación de vectores y enfermedades asociadas a la contaminación hídrica.

Vale la pena mencionar que, al existir un mayor número de zonas permeables, se intercepta mayor cantidad de lluvia, evitando desbordamientos del drenaje sanitario (saturación de la red) por sobrecarga de las aguas pluviales y, en consecuencia, disminuye el riesgo de inundación. Los SUDS evaluados en este proyecto permiten tener áreas permeables dentro del Fraccionamiento, integrando elementos ajardinados y pavimentos de infiltración total con el

objetivo de mitigar los problemas de cantidad y calidad de escorrentía, minimizando los impactos del desarrollo urbanístico, mejorando la integración paisajística y resaltando el verdadero valor del agua pluvial (Tratalos *et al.*, 2007; Sañudo *et al.*, 2012). Adicionalmente, la implementación de los SUDS puede generar ambientes recreativos de uso público, que fomenten la integración de los habitantes, la toma de conciencia y la participación hacia soluciones sostenibles.

8.3.1 Relación entre Objetivos de Desarrollo Sostenible y los Sistemas de Urbanos de Drenaje Pluvial

La implementación de alguno de los dos sistemas de drenaje pluvial debe estar alineada con los ODS para mejorar el bienestar y calidad de vida de la población. Es por ello que se plantearon estrategias para llevar a cabo el objetivo de las buenas prácticas y la correcta gestión del recurso hídrico. En la Tabla 24 se proponen algunas acciones en relación con diferentes ejes temáticos a tratar, como el agua, el suelo, el espacio público, la infraestructura y el cambio climático.

Tabla 24. Estrategias para la mejora del Sistema Urbano de Drenaje existente en el Fraccionamiento Rancho Bellavista

EJES TEMÁTICOS	ESTRATEGIAS
<p>Agua Objetivo: Lograr la gestión integral del agua pluvial en el Fraccionamiento Rancho Bellavista</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aprovechamiento y utilización del agua lluvia. 2. Gestión sustentable del recurso pluvial. 3. Desarrollo de estructuras sostenibles como los SUDS. 4. Alcanzar el equilibrio del acuífero. 5. Reproducir el ciclo hidrológico natural. 6. Reducir el malgasto de las reservas de agua. 7. Mejorar el tratamiento del agua. 8. Amortiguar tragedias naturales como las inundaciones. 9. Preservar la calidad de las aguas receptoras de escorrentías urbanas. 10. Proteger suelos de conservación para la recarga de acuíferos.
<p>Habitabilidad y espacio público Objetivo: Rescatar y/o crear espacios públicos, fomentando la integración social.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desarrollo de proyectos ordenadores con espacios públicos, amplios, diseñados con criterios de sostenibilidad. 2. Impulso al desarrollo de viviendas de interés social de manera sostenible con la implementación de SUDS. 3. Mejorar la calidad de vida de los habitantes de vivienda de interés social. 4. Incremento de las áreas verdes y elementos de accesibilidad para los espacios públicos.
<p>Suelo Objetivo: Recuperar el suelo urbanizado como espacios claves del equilibrio ecológico del ciclo del agua.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Impulsar el ciclo hidrológico natural. 2. Restauración y conservación de ecosistemas. 3. Integrar la gestión y tratamiento de aguas lluvias al paisaje. 4. Incrementar el valor añadido del suelo minimizando costes. 5. Modernizar las redes de drenaje pluvial. 6. Control de zonas inundables.
<p>Cambio climático Objetivo: Reducir las emisiones de gases efecto invernadero (GEI), mediante acciones de adaptación al cambio para la población.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Apoyar las acciones de los planes del recurso hídrico, atmosférico y espacio público, mediante la implementación de SUDS para la disminución de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). 2. Reducir la vulnerabilidad de la ciudad Santiago de Querétaro ante el cambio climático. <ol style="list-style-type: none"> 1. Implementar medidas de adaptación para la población, así como los SUDS.

Tabla 24. (Continuación)

EJES TEMÁTICOS	ESTRATEGIAS
Infraestructura Objetivo: Impulsar los sistemas de drenaje con criterios de sostenibilidad.	1. Impulsar infraestructuras de drenaje que fomenten la salubridad y seguridad a la población del Fraccionamiento Rancho Bellavista. 2. Promover la gestión integrada del agua a espacios públicos. 3. Desarrollar técnicas de gestión de aguas pluviales y planeamiento urbano. 4. Corregir las deficiencias de las redes de drenaje existentes en el conjunto de VIS.

Los ODS asociados a cada uno de los sistemas de drenaje pluvial aplicados al área de estudio se mencionan en la Tabla 25. En ella se evidencia que no todos los objetivos son aplicables para ambos sistemas de drenaje, debido a la finalidad y características de cada uno de ellos.

Tabla 25. Objetivos del Desarrollo Sostenible asociados a los Sistemas Urbanos de Drenaje Pluvial

OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	SISTEMA DE DRENAJE SOSTENIBLE	SISTEMA DE DRENAJE CONVENCIONAL
1. Fin de la pobreza	X	X
3. Salud y bienestar	X	X
6. Agua limpia y saneamiento	X	X
8. Trabajo decente y crecimiento económico	X	X
9. Industria, innovación e infraestructura	X	
11. Ciudades y comunidades sostenibles	X	X
13. Acción por el clima	X	
15. Vida de ecosistemas terrestres	X	

Como se ha mencionado, los sistemas de drenaje convencional tienen el propósito de evacuar de la manera más rápida posible la escorrentía de agua de lluvia, por lo cual aplican los objetivos 1, 6, 8 y 9, al implementar infraestructuras de gestión del agua pluvial, ayudan a reducir la exposición y vulnerabilidad a fenómenos extremos como inundaciones, permiten minimizar el porcentaje de aguas residuales a tratar, siempre y cuando el sistema se maneje por separado, logran generar empleo y reducen el número de personas afectadas por desastres naturales. En contraste, los SUDS se caracterizan por tratar de reproducir de la manera más fiel el ciclo hidrológico previo a la urbanización. Por este motivo, se alinean con todos los ODS mencionados en la Tabla 25, es decir: fomentan la resiliencia en poblaciones vulnerables a fenómenos relacionados extremos, reducen el riesgo por desastres económicos, sociales y ambientales relacionados con eventos hidrometeorológicos, mejoran y fomenta la calidad del agua, aire y suelo, mejoran progresivamente la producción y el consumo eficiente de los recursos, procurando desvincular el crecimiento económico de la degradación del medio ambiente, desarrollan infraestructuras resilientes y sostenibles para apoyar el bienestar humano, y finalmente, luchan contra la degradación de suelos y hábitats naturales.

8.3.2 Matriz de Leopold

La evaluación de los impactos sociales asociados al ciclo de vida de los sistemas urbanos de drenaje pluvial de acuerdo a la matriz de Leopold se observa en las Tablas 26 y 27 para las tres

etapas correspondientes a la construcción, operación y desmantelamiento. Los colores con tendencia al rojo representan afectaciones negativas por la actividad realizada durante la etapa, por su parte, si el color se acerca al verde indica afectaciones positivas.

Tabla 26. Matriz de Leopold aplicada al Sistema Urbano de Drenaje Convencional

MATRIZ DE LEOPOLD		ACCIONES								IMPACTO			
		CONSTRUCCIÓN			OPERACIÓN		DESMANTELAMIENTO			(-)	(+)	PONDERADO	
		A.1	A.2	A.3	A.4	A.5	A.6	A.7	A.8				
CATEGORÍAS SOCIALES	SOCIAL	MC	-2	-8	-8		-1	-8	-8	-2	7	0	-38
		REA									0	0	0
		SS	-2	-9	-6	8	-2	-9	-6	-2	7	1	-14
		CEV		-8	-7			-8	-7		4	0	-62
		GE	1	5	6	1	3	5	6	1	0	8	32
		GSP				9					0	1	27
IMPACTO	(-)		2	3	3	0	2	3	3	2			
	(+)		1	1	1	3	1	1	1	1			
	PONDERADO		-3	-36	-15	53	0	-36	-15	-3			
	por ETAPA		-54			53		-54					
												-55	

MC: modificaciones culturales, REA: recreación y espacios abiertos, SS: salud y seguridad, CEV: calidad estética y visual, GE: generación de empleo, GSP: generación de servicios públicos

A.1: transporte de materiales y equipos A.2: preparación del terreno (excavación), A.3: obras civiles (instalación), A.4: uso, A.5: mantenimiento, A.6: preparación terreno (excavación), A.7: obras civiles (desmantelamiento), A.8: transporte de residuos

De acuerdo con la matriz, se evidencia un cambio de la dinámica sociocultural por la construcción, mantenimiento y desmantelamiento del sistema de drenaje convencional, debido a que la población debe acoplarse a las actividades del proyecto. Por tal motivo, se presentan efectos negativos sobre las modificaciones culturales con una afectación media de intensidad baja para actividades de traslado y disposición de residuos, y alta en el proceso de excavación e implementación de los componentes del sistema.

Una vez sea construido el sistema e inicie su operación, el factor de riesgo para la salud de las personas se reducirá, permitiendo mejorar considerablemente la calidad de vida de la población, ya que se reduce el riesgo a inundaciones. No obstante, la construcción y abandono de la infraestructura generan un riesgo para la salud si no se tienen las medidas necesarias de seguridad, debido a que se pueden presentar efectos negativos sobre la calidad del aire, el oído y la vista por la generación de partículas en el traslado de materiales y equipos, y el ruido de la maquinaria durante la implementación del sistema.

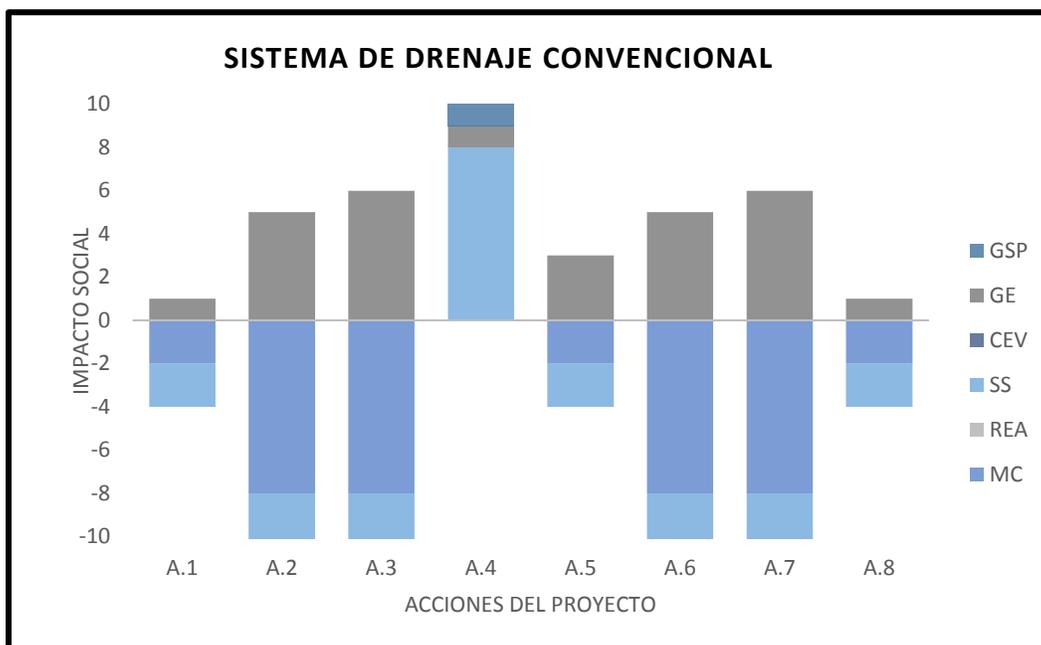


Figura 19. Impactos sociales de los sistemas de drenaje convencional

Para la etapa de construcción se requieren trabajos de excavación y colocación de la infraestructura, en la que se remueve el suelo, afectando de manera negativa con un alto grado de magnitud a la población debido al deterioro de la percepción visual y daño a las cubiertas del suelo natural. Esto a su vez ocasiona variaciones en el clima, fomentando la proliferación de enfermedades sensibles a los cambios de temperatura y pluviosidad. De acuerdo con Jose *et al*, (2014), estas actividades ocasionan una modificación del calor latente y sensible de la radiación en las zonas alteradas durante la fase de construcción, en la cual se modifica el suelo y elimina vegetación. Es por ello que causará un aumento de la sequedad del ambiente, cambios en la temperatura y el contenido de humedad en el sitio y, en consecuencia, en el microclima local.

Durante las etapas de construcción, operación y desmantelamiento del sistema de drenaje convencional para el Fraccionamiento Rancho Bellavista, el proyecto proveerá de empleo a personas que residen en el sector y otros sitios aledaños. Su impacto tiene un efecto positivo con carácter temporal en la fase de construcción y desmantelamiento, y de carácter medio en las fases de operación y mantenimiento.

La operación del sistema incide de manera positiva en el área de estudio, puesto que ofrece un servicio público a la población al disminuir el riesgo a eventos extremos como inundaciones y respeta el derecho a tener un nivel de vida que asegure la salud y el bienestar de la población. Coincidente con Charlesworth (2010), se han demostrado en varios estudios que la proximidad a los espacios verdes en un área urbana tiene un impacto positivo en las percepciones de la salud y el bienestar.

Finalmente, el ponderado de los impactos sociales para el sistema de drenaje pluvial convencional es negativo, ya que sus etapas de construcción y desmantelamiento resultan perjudiciales y, de ser necesaria su ejecución, deberán tomarse medidas de corrección o mitigación para las acciones que mayor deterioro ocasionen a nivel social. Vale la pena mencionar

que la correcta operación de la infraestructura provee de beneficios a las personas del conjunto de VIS (Ver Figura 20).

Tabla 27. Matriz de Leopold aplicada al Sistemas Urbano de Drenaje Sostenible

MATRIZ DE LEOPOLD		ACCIONES									IMPACTO		
		CONSTRUCCIÓN			OPERACIÓN		DESMANTELAMIENTO				(-)	(+)	PONDERADO
		B.1	B.2	B.3	B.4	B.5	B.6	B.7	B.8				
CATEGORÍAS	SOCIAL	MC	-2	-7	-7	9	-1	-7	-7	-2	7	1	-7
		REA				6					0	1	18
		SS	-2	-8	-5	8	-1	-5	-8	-2	7	1	-8
		CEV		-7	-6	7		-7	-6		4	1	-19
		GE	1	5	6		3	5	6	1	0	7	30
		GSP				9					0	1	27
IMPACTO	(-)	2	3	3	0	2	3	3	2				
	(+)	1	1	1	5	1	1	1	1				
	PONDERADO	-3	-24	-12	117	2	-21	-15	-3				41
	por ETAPA	-39			119		-39						

MC: modificaciones culturales, REA: recreación y espacios abiertos, SS: salud y seguridad, CEV: calidad estética y visual, GE generación de empleo, GSP: generación de servicios públicos

B.1: transporte de materiales y equipos B.2: preparación del terreno (excavación), B.3: obras civiles (instalación), B.4: uso, B.5: mantenimiento, B.6: preparación terreno (excavación), B.7: obras civiles (desmantelamiento), B.8: transporte de residuos

Al igual que los sistemas de drenaje convencional, el desarrollo de los SUDS en el Fraccionamiento Rancho Bellavista presenta un cambio en la dinámica sociocultural en las etapas de construcción y desmantelamiento, puesto que procesos como excavación del suelo, implementación del sistema y el transporte tanto de materiales y residuos generan cambios en las actividades cotidianas de la población de carácter temporal. Sin embargo, se observa un impacto positivo de gran magnitud en la etapa de operación, debido a que favorece la inclusión social, conciencia y participación ciudadana hacia soluciones sostenibles que aumenten significativamente la calidad de vida de las áreas urbanizadas.

Como se ha mencionado, los SUDS se apoyan de elementos ajardinados y la implementación de áreas de biorretención podría embellecer la construcción urbana, además de darle un uso multifuncional que fomente la inclusión social entre las personas que residen en el fraccionamiento y quienes viven a los alrededores. Por este motivo, la etapa de operación presenta un impacto positivo de carácter permanente y afectación alta. Autores como Jose *et al*, (2014) y Kennedy *et al*, (2007) mencionan los beneficios de la integración de espacios abiertos para la recreación, mejorando notablemente la salud y el bienestar físico y mental de las

personas, además de considerarse áreas ricas en biodiversidad y vida silvestre urbana.

En cuanto a la etapa de construcción y desmantelamiento del sistema pluvial en el Fraccionamiento Rancho Bellavista, se pueden generar impactos negativos sobre la salud humana por la emisión de partículas en el transporte de materiales y equipos, por material suspendido en las actividades de excavación e integración de los pavimentos. Estos impactos podrían aumentar de no contar con las medidas necesarias para asegurar la seguridad de la población. No obstante, la actividad de uso del sistema en la etapa de operación manifiesta un impacto positivo de grado alto con carácter permanente, ya que permite la disminución de gases de efecto invernadero, reduce la cantidad de contaminantes presentes en la escorrentía y evita el aumento de temperatura. Tal y como menciona Charlesworth (2010), los SUDS implican múltiples beneficios en materia de cambio climático para la salud humana y ambiental mediante el secuestro y/o almacenamiento de carbono, la mitigación del efecto de la isla de calor urbano y el enfriamiento urbano.

La calidad estética y visual del proyecto tiene un impacto positivo de carácter permanente en la actividad de uso durante la etapa de operación, puesto que aumentan el valor paisajístico del área de influencia y embellecen el área urbana. Sin embargo, las etapas de construcción y desmantelamiento ocasionan impactos negativos de carácter medio y alto por actividades de excavación, colocación de infraestructura y desmonte.

La ejecución de los SUDS generará empleo a personas que residen en el Fraccionamiento y se encuentran en zonas cercanas. Su impacto tiene un efecto positivo, con carácter temporal en la fase de construcción y desmantelamiento, y de carácter medio en las fases de operación y mantenimiento, debido a que requieren de limpieza rutinaria una vez al mes y limpieza profunda cada año. Este incremento de la mano de obra puede generar cambios en la estructura demográfica y en las condiciones de circulación, favoreciendo al crecimiento económico del área de estudio. El impacto es de carácter temporal y mediano con afectación media y alta. Lo anterior concuerda con el trabajo descrito por Vineyard *et al.*, (2015), en donde se resalta que el uso de SUDS puede generar empleos, ya que su instalación y mantenimiento requieren cantidades relativamente grandes de mano de obra no cualificada durante un período prolongado de tiempo.

La operación del sistema incide de manera positiva en el área de estudio, puesto que ofrece un servicio público a la población al disminuir el riesgo a eventos extremos como inundaciones y respeta el derecho a tener un nivel de vida que asegure la salud y el bienestar de la población. Asimismo, los SUDS ofrecen servicios de soporte y regulación, así como servicios sociales y culturales, como lo describe Jose *et al.*, (2014).

Por último, el ponderado de los impactos sociales para el sistema de drenaje sostenible es positivo; es decir, que su operación produce beneficios a la comunidad. A pesar del resultado, vale la pena mencionar que los SUDS necesitan medidas de prevención, corrección o mitigación para los impactos negativos encontrados en las etapas de construcción y desmonte para reducir el deterioro de la calidad y bienestar de la población y, de esta manera, potenciar los beneficios ambientales, sociales y económicos (Ver Figura 20).

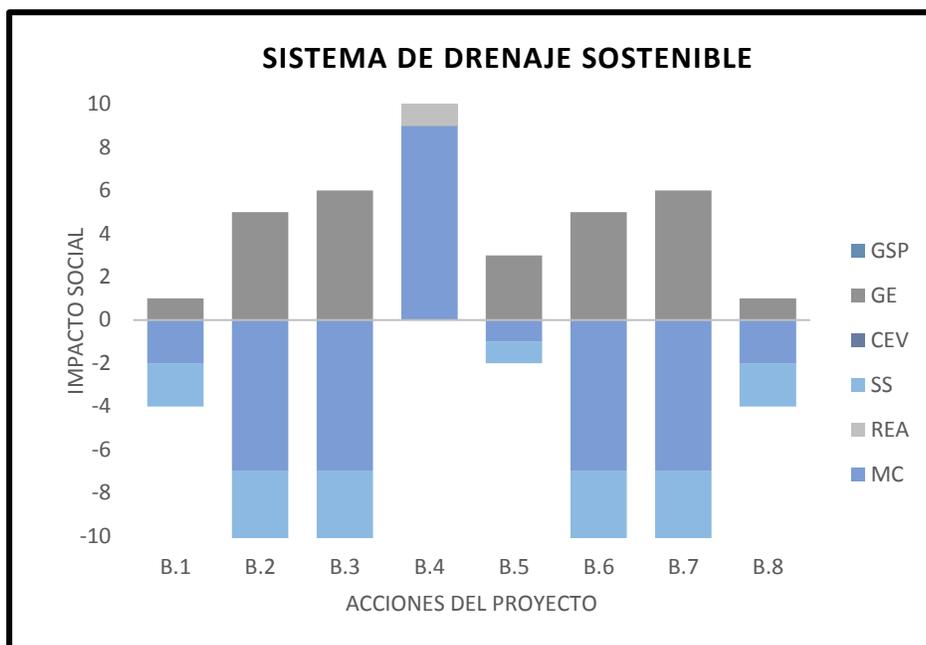


Figura 20. Impactos sociales de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

8.3.3 Perspectiva a nivel institucional

Con el objetivo de complementar la evaluación de los impactos sociales, se realizaron entrevistas semiestructuradas para conocer la perspectiva a nivel institucional acerca de la implementación de los sistemas de drenaje pluvial en VIS de la ciudad de Santiago de Querétaro. El organismo que se tomó para el desarrollo de la actividad fue la Comisión Estatal de Aguas (CEA), quien de acuerdo con el Art. 21. del Código Urbano Del Estado De Querétaro, es el “Organismo coordinador y coadyuvante con autoridades federales, estatales o municipales, en todas las actividades que de una manera u otra participen en la planeación, estudios, proyectos, construcción y operación de sistemas o instalaciones de agua potable, alcantarillado, saneamiento y disposición de sus aguas residuales y tratadas y servicios relacionados con éstos, para beneficio de los habitantes del Estado” (Estado de Querétaro, 2012). En consecuencia, se entrevistó al personal de la Dirección Divisional de Hidráulica y Construcción, Dirección Divisional de Saneamiento y Dirección Divisional de Proyectos de Infraestructura, pertenecientes a la Dirección General Adjunta de Operación Técnica.

En relación con las entrevistas, la CEA reconoce la presencia de problemas de inundación en el área metropolitana de la ciudad, debido al crecimiento desmedido de la mancha urbana, sumado a la falta de una entidad que se encargue de su regulación y planificación. En consecuencia, se evidencia la impermeabilización del suelo y modificación de las condiciones naturales de la cuenca hidrológica al aumentar el tiempo de respuesta a las escorrentías pluviales. Conforme a lo anterior, la CEA resalta sus funciones en materia de servicios de agua potable, alcantarillado, drenaje, saneamiento y disposición de sus aguas residuales y tratadas, como organismo público y descentralizado. Estas funciones se describen en el Art. 402 de Código Urbano Del Estado De Querétaro.

A nivel institucional, los sistemas de drenaje pluvial se consideran como una red de tuberías, sumideros e instalaciones complementarias que permite encausar y desalojar de manera rápida

el agua de lluvia, y así evitar posibles molestias e incluso daños materiales y humanos por la acumulación o escurrimiento superficial. El proceso para la implementación de estos sistemas es un trabajo en conjunto entre la CEA y el municipio de Querétaro. Así, la Comisión verifica, supervisa y establece los lineamientos para el diseño de las infraestructuras por parte de los desarrolladores, haciendo hincapié en la construcción de sistemas independientes a la gestión de aguas sanitarias. No obstante, son muchos los conjuntos de vivienda que no cumplen con esta especificación, debido a que años atrás los lineamientos eran muy flexibles y con pocas restricciones. A su vez, esto ha impedido el aprovechamiento del agua de lluvia y ha acentuado la generación de efectos adversos sobre el medio ambiente y la comunidad. Del otro lado, el municipio se encarga de la operación y mantenimiento de los drenajes pluviales. En cuanto al fin de la vida útil del drenaje, la CEA no ha tenido experiencia, por lo que supone se haría una rehabilitación o sustitución de la red, la cual estaría a cargo del municipio.

Por otra parte, la institución no tiene conocimiento de alternativas sustentables para la gestión del agua pluvial como los SUDS, pero sí conoce alternativas para la reutilización del agua de lluvia, como, por ejemplo, la captación del recurso para el riego de áreas verdes, jardines o cultivos y para su uso doméstico. Además, debe considerarse el beneficio que ocasionaría el reúso del agua al medio ambiente y la comunidad.

Los entrevistados consideran de vital importancia la creación de una nueva dependencia encargada de supervisar, evaluar y remodelar las infraestructuras existentes para tener una gestión integral del recurso pluvial, para que de esta manera se pueda aprovechar el agua. Igualmente, reflexionan acerca del papel que juega el municipio de Querétaro y la Secretaría de Desarrollo Sostenible en la generación de leyes, códigos ambientales y planes de desarrollo municipal encaminados a la gestión de las aguas de lluvia en la ciudad de Santiago de Querétaro; sin embargo, hace falta colocar en práctica dicha normatividad.

Con base a la entrevista, se reconoce la necesidad de tener un cambio de paradigma, donde la gestión del recurso hídrico en las ciudades tome como base el ciclo natural del agua, y considere medidas susceptibles de regulación, mitigación y prevención de impactos dañinos al medio ambiente y a la población. Esto permitirá avanzar en un uso más sostenible del agua a diferentes escalas. La evaluación de los sistemas de drenaje con enfoque de análisis ciclo de vida puede ayudar en la definición y priorización de estrategias para llegar a la sostenibilidad, debido a que puede evitar distintos tipos de efectos adversos a nivel espacial, temporal, ambiental, social y económico (Petit-Boix *et al.*, 2017). Estas estrategias deben estar definidas para cada problema y ser promovidas por los responsables de la toma de decisiones, así como el Municipio de Querétaro, la Secretaría de Desarrollo Sostenible y la CEA. Asimismo, los desarrolladores, operadores y usuarios potenciales de este tipo de infraestructuras también juegan un rol importante a la hora de diseñar o seleccionar acciones que minimicen los impactos y maximicen sus beneficios, ya que se abarca un amplio espectro de intereses en relación con el medio ambiente y la formulación de políticas (Field III y Ehrenfeld, 1999). En la Tabla 24 se observa algunas de las estrategias que se pueden trabajar en la ciudad de Santiago de Querétaro, en relación a los problemas asociados a los sistemas de drenaje pluvial.

Por último, el trabajo conjunto de diferentes actores ayudaría a promover el desarrollo urbano sostenible, gracias a la actuación integral con un enfoque de derechos humanos, sostenibilidad

e innovación, alineados con los ODS de la Agenda 2030 (Otaño, 2017). Un ejemplo para llevar a cabo la intervención es la descrita por la ONGD Arco iris², la cual se sustenta en los siguientes pilares:

- a) **Comunicación y participación:** con el objetivo de promover la participación a distintas escalas, ayudando a la gestión urbana; asimismo, mantener la comunicación para replicar modelos y estudios en distintas áreas.
- b) **Investigación y acción:** se busca mantener procesos de investigación tras las diferentes intervenciones urbanas, de modo que permita aprender de las acciones y se logre continuar con la actuación de los diferentes actores.
- c) **Medición y monitoreo:** hace referencia al desarrollo de indicadores para la generación de datos sobre la realidad, basándose en el Índice de Bienestar Económico Sostenible; con esto, se busca medir el riesgo y llevar a cabo una labor de seguimiento.

Otras variables a considerarse para llevar a cabo su aplicación en los distintos conjuntos de VIS como el Fraccionamiento Rancho Bellavista son la seguridad, la cohesión comunitaria, el cuidado común de los espacios públicos y la formación e información. Los anteriores elementos, ayudarían a potenciar la protección vecinal mediante el intercambio visual en los diferentes entornos, la creación de comunidades más unidas a través del trabajo en conjunto, la generación de conciencia ciudadana y el acceso a los conocimientos de los sistemas implantados para la gestión del agua pluvial (Otaño, 2017).

² ONGD Arco iris: Educación para el desarrollo, es una organización sin ánimo de lucro que busca promover, impulsar y desarrollar todo tipo de proyectos o actividades destinadas a favorecer una mejora en la calidad de vida en los países subdesarrollados, en especial en los campos de la educación y la sanidad. Ver: <http://www.ongdarcoiris.org>

9 CONCLUSIONES

Los procesos de urbanización generan la degradación ambiental y el desequilibrio ecológico, siendo el agua y el suelo los recursos más afectados, debido a la pérdida de superficies permeables. A esto se le suma problemas de mala gestión de los recursos, el incremento en el riesgo a inundaciones y la falta de consciencia por parte de los diferentes actores involucrados.

A lo largo del tiempo, los sistemas de drenaje urbano convencional han mostrado su incapacidad para hacer frente a eventos extremos, como las inundaciones, derivados de alteraciones ambientales y cambios demográficos, quedando obsoletos ante las necesidades actuales con consecuencias ambientales y sociales que pueden mitigarse mediante el uso de un nuevo modelo de administración sensible al agua y orientado hacia un futuro sostenible como los SUDS.

La implementación del sistema urbano de drenaje pluvial convencional en el conjunto de VIS en la ciudad de Santiago de Querétaro resulta menos costosa en comparación con el SUDS con una diferencia del 62.17%. No obstante, la implementación de este último contribuye positivamente en los ámbitos social y ambiental, gracias a los beneficios y servicios que provee.

Los resultados demuestran que los mayores impactos ambientales en la implementación de sistemas de drenaje pluvial afectan al cambio climático y la eutrofización de agua dulce, principalmente por los procesos de transporte y excavación en las etapas de construcción y desmantelamiento. Este estudio además permitió revisar varios problemas de tipo ambiental, social y económico derivados en la captación de agua de lluvia.

Pese a que las etapas de construcción y desmantelamiento generan efectos adversos sobre el medio ambiente y la población, las nuevas tecnologías de gestión de las aguas de lluvia como los SUDS generan impactos positivos en su etapa de operación, debido a que proveen de beneficios sociales, como salud y bienestar a las personas, inclusión social y generación de empleo.

La implementación del sistema de drenaje convencional en el Fraccionamiento Rancho Bellavista resulta más económica en comparación con el sistema de drenaje sostenible, debido a que su implementación, operación y mantenimiento requiere de materiales más económicos, menor volumen de excavación y menor frecuencia y mano de obra para mantenerla durante todo su ciclo de vida. No obstante, es importante resaltar que la implementación de SUDS contribuye positivamente en los ámbitos sociales y ambientales, ya que disminuye considerablemente los impactos adversos sobre estas áreas y provoca beneficios a largo plazo. Si se cuantifican monetariamente estos beneficios se podrían compensar esta diferencia de costes.

Los SUDS podrían también considerarse inicialmente como un complemento a la red de drenaje urbano convencional como parte de la transición hacia infraestructuras verdes, para dar soluciones a los problemas ocasionados por las aguas de lluvia asociados a la cantidad y calidad. Estos pueden provocar afectaciones al medio ambiente y al bienestar y calidad de vida de las personas, de modo que se potenciaría sus beneficios y disminuiría el riesgo a inundaciones localizadas gracias a la capacidad de amortiguación que tienen estas alternativas.

Se considera fundamental dar el apoyo necesario por parte de los diferentes actores institucionales encargados de la gestión del agua de lluvia al fomento de nuevas tecnologías que provean de diversos beneficios a nivel social y ambiental, principalmente proponiendo nuevas legislaturas para su implantación progresiva en los entornos urbanos. Lo anterior es resultado de la evidente falta de una normativa específica que regule la integración de los sistemas de drenaje pluvial convencional y los SUDS para el beneficio de la comunidad.

En relación a las perspectivas de la investigación, se evidencia la falta de una integración interdisciplinar entre los diferentes actores y profesionales para la integración y planificación de infraestructuras para la gestión del agua pluvial en las zonas urbanas. Se observan avances significativos en el tema, en cuanto al interés hacia nuevas tecnologías al tener un primer acercamiento a las mismas. No obstante, hace falta profundizar en la manera de llevar a cabo esta implementación a la vida real, debido a que se reconocen los SUDS como infraestructuras innovadoras, pero carecen de experiencia en relación a los materiales, formas de ejecución y elegibilidad entre otros, principalmente en países como México.

Factores como la falta de conciencia por parte de los diferentes actores, la centralización de los servicios, la falta de difusión de experiencias y conocimientos, la carencia de protocolos estandarizados para el diseño y monitoreo de infraestructuras, la falta de presupuestos y las barreras culturales son algunos de los desafíos que existen en México para lograr una gestión sostenible del agua mediante la implementación de nuevas tecnologías como los SUDS.

La evaluación de los impactos asociados a los sistemas de drenaje pluvial con enfoque de análisis ciclo de vida demuestra que los componentes de las etapas de construcción, operación y desmantelamiento tienen gran influencia en el desempeño ambiental, social y económico en los conjuntos urbanos de VIS. Esto permite una mejor comprensión de los impactos y una visión más amplia a distintos actores para refinar la implementación de infraestructuras en relación con los ODS; de este modo, sería de gran importancia que los próximos proyectos abarquen este enfoque holístico.

10 RECOMENDACIONES

10.1 LIMITACIONES

En la aplicación de la metodología propuesta en el presente trabajo al conjunto de VIS Fraccionamiento Rancho Bellavista, ubicado en la ciudad de Santiago de Querétaro, se encontraron varias limitaciones.

- Dificultad para encontrar proyectos de infraestructura sostenible para la gestión del agua pluvial en conjuntos de VIS en México.
- Falta de datos para la caracterización de los sistemas de drenaje pluvial, así como el modelado de los sistemas para contrastar los elementos hidráulicos del funcionamiento.
- Escasez de información a una escala localizada para obtener resultados de impactos concluyentes. Por esta razón, se recopilaron datos mediante información bibliográfica.
- La elaboración de las entrevistas estuvo condicionada a la disponibilidad de tiempo y espacio por parte de los actores institucionales. Estas se desarrollaron de manera grupal, de modo que las respuestas pueden verse afectadas por la opinión de otros actores presentes.
- Falta de estudios previos para la evaluación de impactos sociales de los sistemas de drenaje pluvial que permitan la comparación de resultados.

10.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- Resulta de gran interés el desarrollo de futuras líneas de investigación para continuar avanzando hacia una gestión sostenible de las aguas de lluvia a nivel local y regional.
- Se podrían definir umbrales de referencia para la evaluación de los impactos ambientales, sociales y económicos; además, sería deseable establecer un sistema unificado de indicadores de sostenibilidad para la gestión del recurso pluvial, permitiendo su aplicación a nivel nacional.
- Sería conveniente la evaluación de distintos escenarios en la que se diversifique por material, escala, combinación y trenes de sistemas de drenaje pluvial e inclusive la comparación con sistemas mixtos.
- Interesaría conocer la percepción de diferentes actores sociales acerca de las inundaciones, áreas verdes, infraestructuras y la gestión de las aguas de lluvia entorno a las ciudades.
- Se podrían evaluar los beneficios que proveen de los sistemas de drenaje urbano pluvial en el ámbito ambiental, social y económico mediante distintos métodos de valoración.

- Convendría ampliar los aspectos a evaluar en cada uno de los sistemas urbanos de drenaje pluvial, así como, maquinaria, mano de obra, aspectos técnicos y aspectos políticos entre otros.
- Establecer un manual para la implementación de sistemas de drenaje sostenible en México, a partir, de los numerosos artículos y guías técnicas publicados en esta materia. Asimismo, debería contemplarse la experiencia de otros países.

11 REFERENCIAS

- Albellan García, I. (2013). *Tesis*. Sistemas de drenaje urbano sostenible: aplicación práctica a un tramo de la diagonal de Barcelona. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Alderete Herrera, J. (2010). *Viviendas de interés social*. Universidad Veracruzana.
- Beltrán Hernández, E. (2011). *Tesis*. Proyectos ejecutivos de las redes de distribución de agua potable, drenaje sanitario y drenaje pluvial del fraccionamiento Rancho Bellavista, municipio de Querétaro, Edo. de Querétaro. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Betancourt Quiroga, C. (2017). *Tesis Doctoral*. Análisis de ciclo de vida como herramienta de planificación territorial empleando las matrices Insumo-Producto aplicado a la vivienda de interés social construida en México durante el 2000 – 2012. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Brandt Rauf, P. W., Li, Y., Long, C., Monaco, R., Kovvali, G. y Marion, M. j. (2012). Plastics and cancerogenesis: The example of vinyl chloride. *Journal of Carcinogenesis*. 11 (5).
- Carrillo Fajardo, E. (2016). *Tesis*. Infraestructura verde como estrategia para el manejo sustentable del agua pluvial. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [CEDEX] Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. (2008). Gestión de las aguas pluviales: implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano / Jerónimo Puertas Agudo, Joaquín Suárez López, José Anta Álvarez. Monografías; M-98. Madrid: Ministerio de Fomento, CEDEX, Centro de Estudios Hidrográficos.
- CEPEP. (1998). Evaluación social del proyecto de construcción del drenaje sanitario al alto vacío fase "b", en la ciudad de Chetumal, Quintana Roo. *Reporte*. México.
- Charlesworth, S.M. (2010). A review of the adaptation and mitigation of global climate change using sustainable drainage in cities. *Journal of Water and Climate Change*. Chang. 1 (3), pp. 165–180.
- [CIRIA] Construction Industry Research and Information Association. (2001). Sustainable urban drainage systems, best practice manual for England, Scotland, Wales and Northern Ireland. London.
- [CONAGUA] Comisión Nacional de Agua. (2017). Catálogo general de precios unitarios para la construcción de sistemas de agua potable y alcantarillado. Sugerencia de precios y costos unitarios. México.
- [CONAGUA] Comisión Nacional de Agua. (2016). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado N°4. México.

- [CONAGUA] Comisión Nacional de Agua. (2016). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Drenaje pluvial urbano N°19. México.
- Curran, M. A. (2014). Strengths and Limitations of Life Cycle Assessment. En W. Klöpffer (Ed.), *Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment* (53) pp. 189–206. Cincinnati, Ohio: Springer.
- Díaz Bravo, L., Tocurro García, U., Martínez Hernández, M. y Varela Ruiz, M. (2013). La entrevista, recurso flexible y dinámico. *Investigación en educación médica*. 2(7), pp 162-167.
- Estado de Querétaro. (2012). Código Urbano Del Estado De Querétaro. *Periódico oficial del Gobierno del Estado “La sombra de Arteaga”*. P.O. N° 27.
- Field III, F. y Ehrenfeld, J. (1999). Life-Cycle Analysis: The Role of Evaluation and Strategy. *Measures of Environmental Performance and Ecosystem Condition*. Pp 29-41. National Academy of Engineering. Washington, D.C.
- [FIQMA] Fidecomiso Queretano para la conservación del Medio Ambiente. (2015). Catálogo de plantas nativas. Consultado: noviembre de 2018. Ver en línea: <http://www.fiqma.org/images/Comunicacion.Publicaciones/CatalogoPlantasNativas2015.pdf>
- Flynn, K y Traver, R. (2013). Green infrastructure life cycle assessment: A bio-infiltration case study. *Ecological Engineering*. (5), pp. 9-22.
- García Pérez, J; López Abente, G., Castelló, A. y González Sánchez, M. (2015). Cancer mortality in towns in the vicinity of installations for the production of cement, lime, plaster, and magnesium oxide. *Chemosphere*. 128, pp 103 – 110.
- Garibotto, S. (1999). *Tesis de maestría*. Valoración Económica de Bienes Ambientales y su Inclusión en un Análisis de Costo-Beneficio. Departamento de Economía. Universidad de la Republica.
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., Struijs, J., van Zelm, R., y De Schtyver, A. (2013). ReCiPe 2008 a life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Ruimte en Milieu Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer: First edition (versión 1.08)
- Güereca Hernández, L. P. (2006). Tesis Doctoral. Desarrollo de una metodología para la valoración en el Análisis del Ciclo de Vida aplicada a la gestión integral de residuos municipales. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Heijungs, R., Goedkoop, M., Struijs, J., Eftting, S., Sevenster, M. y Huppes. (2003). Towards a life cycle impact assessment method which comprises category indicators at the midpoint

and the endpoint level. The Netherlands. Consultado: marzo de 2019. Ver en línea https://www.leidenuniv.nl/interfac/cml/ssp/publications/recipe_phase1.pdf

Hengel, T. J., Sieverding, H. L. y Stone, J. J. (2016). Lifecycle Assessment Analysis of Engineered Stormwater Control Methods Common to Urban Watersheds. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 142 (7), pp 04016016.1 – 04016016.9.

Herrería Liaño, E. (2014). Estudio de viabilidad de implantación de sistemas urbanos de drenaje sostenible en el área de Santander. Universidad de Cantabria. España

Higuera Zimbrón, A. y Rubio Toledo, M.A. (2011). La vivienda de interés social: sostenibilidad, reglamentos internacionales y su relación en México. *Estudios Territoriales*. Quivera, 13(2), pp. 193-208.

HR Wallinford, Urban Water: Tecnology centre y Univerity of Abertay Dundee. (2003). An assessment of social impacts of sustainable Drainage Systems in UK. *Report SR 622*.

[INECC] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2015). Primer informe Bienal de actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México, 2015.

[INEGI] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2014). Anuario estadístico y geográfico de Querétaro 2014. México.

[INEGI] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). Programa sociodemográfico de Querétaro 2010.

[ISO 14040] International Organization for Standardization. (2007). Environmental management – Life Cycle Assessment – Principles and framework.

[ISO 14044] International Organization for Standardization. (2007). Environmental management – Life Cycle Assessment. Requirements and guidelines.

Jaffe, M. (2010). Environmental reviews & case studies: reflections on Green Infrastructure economics. *Environmental Practice*. 12(4). Pp 357-365.

Jarvie, J., Arthur, S. y Beevers, L. (2017). Valuing Multiple Benefits, and the Public Perception of SUDS Ponds. *Water*. 9(128).

Jeong, H., Broesicke, O., Drew, B., Li D. y Crittenden J. (2016). Life cycle assessment of low impact development technologies combined with conventional centralized water systems for the City of Atlanta, Georgia. *Front. Environmental, Science Eng-* 10(6)

Jose, R., Wade, R. y Jefferies, C. (2014). Smart SUDS: recognizing the multiple-benefit potential of sustainable surface water management systems. *Water Science & Technology*. 71(2), pp 245- 251.

- Kates, R., Clark, W. C., Corell, R., Hall, M., Jaeger, C. C., Lowe, I., McCarthy, J. J., Schellnhuber, H. J., Bolin, B., Dickson, N. M., Faucheux, S., Gallopin, G. C. ... (2001). Sustainability science. *Science*, 292 (5517), pp. 641-642.
- Kennedy, S., Lewis, L. y Wong, S. (2007). Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) – More than a drainage solution? *Novatech*. Pp 423-430.
- Kousky, C. (2016). Impacts of Natural Disasters on Children. *The future of children*. Springer 26 (1), pp, 73-92.
- Kvale, S. (2011). *Las entrevistas en investigación cualitativa*. Morata. España.
- Lenzen, M. (2006). Uncertainty in Impact and Externality Assessments - Implications for Decision-Making. *The international Journal of Life Cycle Assessment*. 11(3), pp 189 – 199.
- Leopold, L. B., Clarke, F. E., Hanshaw, B. B. y Balsley, J. R. (1971). A procedure for evaluating environmental impact. *Circular 645. U.S. Geological Survey*. Washington, D.C.
- López Estrada, R. E. y Leal Iga, J. (2012). Política de vivienda social en México: el caso de una colonia periférica de Monterrey. *Cuadernos de vivienda y urbanismo*. 5(10), pp. 262-277.
- Martínez Cuéllar, C. O. (2015). Tesis. Sistemas urbanos de drenaje sostenible SUDS: infraestructura urbana para el control y aprovechamiento del agua lluvia. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mattila, T., Helin, T., Antikainen, R., Soimakallio, S., Pingoud, K. y Wessman H. (2011). Land use in life cycle assessment. *Finnish Environment Institute*.
- Minnesota Stormwater Manual (2018). Operation and maintenance of permeable pavement. Consultado: enero de 2019. Ver en línea https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php/Operation_and_maintenance_of_permeable_pavement
- Minnesota Stormwater Manual (2018). Operation and maintenance of stormwater infiltration practices. Consultado: enero de 2019. Ver en línea: https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php?title=Operation_and_maintenance_of_stormwater_infiltration_practices
- Mendieta, C. (1999). *Manual De Valoración Económica De Bienes No Mercadeables: Aplicaciones De Las Técnicas De Valoración De Bienes No Mercadeables Y El Análisis Costo Beneficio Y Medio Ambiente*. Centro de Estudios sobre Desarrollo Económico, Universidad de los Andes. Bogotá.
- Municipio de Querétaro. (2015). Plan Municipal de Desarrollo 2015 – 2018. México. Consultado: septiembre de 2018. Ver en línea:

<http://www.fiqma.org/images/Comunicacion.PlanMunicipalDesarrollo/PlanMunicipal2015-2018.pdf>

Municipio de Querétaro y Unidad Municipal de Protección civil. (2015). Atlas de Riesgos del Municipio de Querétaro. México.

[NRMCA] National Ready Mixed Concrete Association. (2011) Pervious Concrete Pavement Maintenance and Operations Guide. Consultado: enero de 2019. Ver en línea: https://www.perviouspavement.org/downloads/pervious_maintenance_operations_guide.pdf

[NU] Naciones Unidas. (1948). Declaración Universal de los Derechos Humanos.

[NU] Naciones Unidas. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Ore, H., Pedrique, J. y Venezia, A. (2007). Evaluación Diseño Sistemas Drenaje Urbano mediante el uso del Modelo Swmm 5 0. Gaceta Técnica de Ingeniería Civil.

Ordoñez Díaz, M. M. y Rueda Quiñonez, L. V. (2017). Evaluación de los impactos socioambientales asociados a la producción de panela en Santander (Colombia). *Corpoica Ciencia Tecnología Agropecuaria*. 18(2), pp 379-396.

O'Sullivan, A. D., Wicke, D., Hengen, T. J., Sieverding, H. L. y Stone, J. J. (2015). Life Cycle Assessment modelling of stormwater treatment systems. *Journal of Environmental Management*. 149, pp 236-244.

Otaño, J. (2017). Los SUDS, regeneradores urbanos en entornos vulnerables: El caso de Bella Vista, República Dominicana. *Escuela Técnica Superior de Arquitectura*. Madrid. Consultado: febrero de 2019. Ver en línea: http://oa.upm.es/52351/1/TFG_Otano_Gonzalez_Julia.pdf

Padilla-Rivera, Alejandro (2015). Tesis doctoral. Metodología para evaluar el desempeño de la infraestructura hídrica en el contexto de la sustentabilidad urbana. Posgrado en Urbanismo- Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

Petit-Boix, A., Llorach-Massana, P., Sanjuan-Delmas, D., Sierra-Perez, J., Vinyes, E., Gabarrell, X., Rieradevall, J. y Sanyé-Mengual, E. (2017), Application of life cycle thinking towards sustainable cities: A review. *Journal of Cleaner Production*. 166, pp 939-951.

Petit-Boix, A., Sanjuan-Delmás, D., Gasol, C. M., Villalba, G., Suárez-Ojeda, M. E., Gabarrell, X., Josa, A. y Rieradevall, J. (2014). Environmental Assessment of Sewer Construction in Small to Medium Sized Cities Using Life Cycle Assessment. *Water Resour Manage*. (28), pp 979–997.

Perales-Momparler, S. y Andrés-Doménech, I. (2008). Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible: Una Alternativa a la Gestión del Agua de Lluvia. Universidad Politécnica de Valencia. España.

- Phillips, R., Kumar Jeswani, H., Azapagic, A. y Apul, D. (2018). Are stormwater pollution impacts significant in life cycle assessment? A new methodology for quantifying embedded urban stormwater impacts. *Science of the Total Environment*. 636, pp 115–123.
- [PNUD] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2012). Objetivos del desarrollo sostenible. Consultado: septiembre de 2017. Ver en línea: <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>
- Rodríguez Arbelo, A. (2017). Tesis. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. Hacia una gestión integral del ciclo urbano de agua. ETSAM. España.
- Ruiz Méndez, D. (2016). Tesis de Maestría. Metodología con enfoque de Análisis de Ciclo de Vida para evaluar el impacto ambiental de insumos adquiridos por una organización. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sánchez Corral, J. (2008). La vivienda “social” en México. Consultado: agosto de 2018. Ver en línea: <http://conurbamx.com/home/wp-content/uploads/2015/05/libro-vivienda-social.pdf>
- Sanes Orrego, A. (2012). Tesis. El análisis ciclo de vida (ACV) en el desarrollo sostenibles: propuesta metodológica para la evaluación de la sostenibilidad de sistemas productivos. Universidad Nacional de Colombia.
- Sañudo Fontaneda, L.; Rodríguez Hernández, J., Castro Fresno, D. (2012). Diseño y construcción de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS). Universidad de Cantabria. España.
- [SF WATER] San Francisco Water Power Sewer (2010). San Francisco stormwater design guidelines.
- [SFPUC] San Francisco Public Utilities Commission. (2009). San Francisco Stormwater Design Guidelines. San Francisco, CA, USA.
- [SHCP] Secretaría de Hacienda y Crédito Público. (2011). Desarrollos Urbanos Integrales Sostenibles. DUIS. Consultado: septiembre de 2018. Ver en línea: http://www.cmic.org.mx/comisiones/sectoriales/vivienda/2011/shf/taller_duis/Presentaciones/Introducci%C3%B3n.pdf
- [SHCP] Secretaría de Hacienda y Crédito Público. (2014). Oficio circular No. 400.1.410.14.009 del 13 de enero del 2014 de la Titular de la Unidad de Inversiones de la SHCP.
- [SHCP] Secretaría de Hacienda y Crédito Público. (2017). Programa presupuestario de Agua Potable, Drenaje y tratamiento. Observatorio del gasto. México. Consultado: mayo de 2018. Ver en línea: <http://nptp.hacienda.gob.mx/programas/jsp/programas/fichaPrograma.jsp?id=16S074>

- Spangenberg, J. (2011). Sustainability science: a review, an analysis and some empirical lessons. *Environmental Conservation*. 38(3), pp. 275-287.
- SUDSostenible. (2016). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. Consultado: octubre de 2018. Ver en línea: <http://sudsostenible.com/sobre-sud-sostenible/>
- Tavakol Davani, H., Burian, S. J., Asce, M., Devkota, J. y Apul, D. (2016). Performance and Cost-Based Comparison of Green and Gray Infrastructure to Control Combined Sewer Overflows. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*. 2 (2), pp 04015009.
- Toronto and Region Conservation y University of Toronto. (2013). Assessment of Life Cycle Costs for Low Impact Development Stormwater Management Practices. Final Report. *Sustainable Technologies Evaluation Program*.
- Tratalos, J., Fuller, R. A., Warren, P. H., Davies, R. G. y Gatón, K. J. (2007). Urban form, biodiversity potential and ecosystem services. *Landscape and urban planned*. 83 (4), pp 308 – 317.
- Uda, M., Van Seters, T., Graham, C. y Rocha, L. (2013). Evaluation of Life Cycle Costs for Low Impact Development Stormwater Management Practices. Sustainable Technologies Evaluation Program, Toronto and Region Conservation Authority.
- [UNEP] United Nations Environment Programme. (2011). Global guidance principles for life cycle assessment databases.
- [UNEP] United Nations Environment Programme. (2004). Why take a life cycle approach? Consultado: enero de 2019. Ver en línea: <http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx0585xPA-WhyLifeCycleEN.pdf>
- [USDT] United States Department of Transportation. (2014). Stormwater Best Management Practices in an Ultra-Urban Setting: Selection and Monitoring. Consultado: diciembre de 2018. Ver en línea: <http://environment.fhwa.dot.gov/ecosystems/ultraurb/>
- [US-EPA] United States Environmental Protection Agency. (2002). Considerations in the design of Treatment BMP to improve water quality. U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati.
- Vineyard, D., Ingwersen, W. W., Hawkins, T. R., Xue, X., Demeke, B. y Shuster, W. (2015). Comparing Green and Grey Infrastructure Using Life Cycle Cost and Environmental Impact: A Rain Garden Case Study in Cincinnati, OH. *Journal of the American water resources association*. 51(5), pp 1342 – 1360.
- Wang, R., Eckelman, M. J. y Zimmerman, J. (2013). Consequential Environmental and Economic Life Cycle Assessment of Green and Gray Stormwater Infrastructures for Combined Sewer Systems. *Environmental Science Technology*. 47 (19), pp 11189–11198.

12 ANEXOS

ANEXO 1. BENEFICIOS DE LOS SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE PLUVIAL

Tabla 28. Beneficios de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en relación con los Sistemas Urbanos de Drenaje Convencional

PARÁMETRO	Drenaje convencional	Área biorretención	Pavimento permeable
Control de la calidad del agua		X	X
Control de la cantidad de agua	X	X	X
Remoción de contaminantes urbanos		X	X
Restauración del ciclo hidrológico natural			X
Reducción y atenuación de escorrentía urbana		X	X
Rápida remoción de escorrentía	X		
Mejora del paisaje urbano			X
Protección de los medios receptores			X
Recarga de acuíferos			X
Reducción de los costes energéticos		X	X
Reducción de la demanda del agua			
Reducción del riesgo de inundación	X	X	
Reducción de emisiones de gases efecto invernadero		X	X
Reducción de sumideros			X
Control en el origen de los caudales		X	X
Regulación de microclimas urbanos		X	
Superficies secas tras episodios de lluvia	X		X
Mejora del aislamiento térmico de los edificios			
Mejora de la salud pública		X	
Aumento del valor de la propiedad		X	
Aumento del caudal de base		X	
Estéticos		X	X
Mejora de la calidad del aire		X	
Educación y participación comunitaria		X	
Construcción óptima en relación al coste-eficiencia			
Provisión de hábitas y biodiversidad		X	X
Atenuación de la contaminación acústica			
Usos recreativos		X	
Aprovechamiento de agua de lluvia			X

Fuente: Adaptado de Rodríguez, 2017

ANEXO 2. SISTEMA URBANO DE DRENAJE CONVENCIONAL

I. CONSTRUCCIÓN (Diseño del sistema)

En este apartado se presenta el diseño del sistema de drenaje pluvial convencional para el Fraccionamiento Rancho Bellavista ubicado en la ciudad de Santiago de Querétaro, trabajo desarrollado por Beltrán (2011).

a) **Áreas tributarias.**

Se definieron áreas que aportaran escurrimientos a la red de drenaje a través de coladeras.

Tabla 29. Áreas tributarias para el Sistema Urbano de Drenaje Convencional

No.	Área (m ²)	No.	Área (m ²)	No.	Área (m ²)
1	8,736.81	27	9,550.32	53	1,789.32
2	1,857.59	28	3,108.85	54	2,592.29
3	660.28	29	3,424.49	55	6,242.37
4	1,300.34	30	2,764.00	56	2,893.22
5	1,576.06	31	2,466.32	57	2,560.00
6	1,328.26	32	3,666.33	58	2,600.10
7	1,508.25	33	2,297.00	59	1,987.00
8	2,784.39	34	5,677.68	60	1,432.00
9	4,475.71	35	6,299.55	61	988.00
10	836.48	36	2,898.09	Total	201,427.18
11	900.42	37	3,087.63		
12	1,205.06	38	3,126.46		
13	3,380.17	39	3,031.57		
14	2,310.71	40	3,597.75		
15	2,589.48	41	4,126.47		
16	3,040.46	42	4,593.32		
17	3,473.72	43	4,710.63		
18	4,001.43	44	4,431.26		
19	4,251.68	45	4,478.58		
20	4,601.85	46	5,543.95		
21	3,820.43	47	3,362.31		
22	4,395.51	48	3,362.26		
23	3,620.41	49	2,380.85		
24	3,288.00	50	5,796.00		
25	5,018.00	51	3,614.66		
26	1,164.29	52	820.76		

Fuente: Adaptado de Beltrán, 2011

b) **Coficiente de escurrimiento.**

Se ponderaron en forma proporcional el valor de cada área de aportación.

Tabla 30. Coeficiente de escurrimiento para el Sistema Urbano de Drenaje Convencional

Tipo de área	Superficie (m ²)	C _i	Sup x C _i
Área Habitacional	94,026.54	0.50	47,013.27
Área Uso Común	6,635.21	0.10	663.52
Área de Vialidad	58,690.88	0.80	46,952.70
Área de Donaciones	17,177.99	0.10	1,717.80
Área Verde	5,959.24	0.13	774.70
Área de Equipamiento	16,150.69	0.10	1,615.07
Total	198,640.55		98,737.06
C_{gral} = 0.50			

Fuente: Adaptado de Beltrán, 2011

c) Valorización del tiempo de concentración.

El tiempo de concentración sobre la superficie se consideró de acuerdo a los manuales de drenaje pluvial de 15 min y el tiempo de traslado a través de los colectores

d) Determinación de la lluvia de proyecto.

La intensidad de lluvia se obtuvo mediante una ecuación que relaciona el período de retorno y la duración de la tormenta. Dicha ecuación la determinó Beltrán (2011) realizando una correlación múltiple de las Isoyetas de Intensidad para diferentes períodos de retorno y duraciones publicadas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Tabla 31. Isoyetas de intensidad ordenadas de mayor a menor

Tr (años)	DURACION (min)				
	5	30	60	120	240
100	176	76	50	28	16
50	166	72	48	27	15
25	155	68	45	25	14

Fuente: Adaptado de Beltrán, 2011

Tabla 32. Constantes para el sistema de ecuaciones

No.	Log d	Log T _r	Log i	X ₁ Y	X ₂ Y	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₁ X ₂
	X ₂	X ₁	Y					
1	0.699	2.000	2.246	4.491	1.570	4.000	0.489	1.398
2	0.699	1.699	2.220	3.772	1.552	2.886	0.489	1.188
3	0.699	1.398	2.190	3.062	1.531	1.954	0.489	0.977
4	1.477	2.000	1.881	3.762	2.778	4.000	2.182	2.954
5	1.477	1.699	1.857	3.156	2.744	2.886	2.182	2.510

Fuente: Adaptado de Beltrán, 2011

Tabla 32. (Continuación)

No.	Log d	Log T _r	Log i	X ₁ Y	X ₂ Y	X ₁ ^2	X ₂ ^2	X ₁ X ₂
	X ₂	X ₁	Y					
6	1.477	1.398	1.833	2.562	2.707	1.954	2.182	2.065
7	1.778	2.000	1.699	3.398	3.021	4.000	3.162	3.556
8	1.778	1.699	1.681	2.856	2.990	2.886	3.162	3.021
9	1.778	1.398	1.653	2.311	2.940	1.954	3.162	2.486
10	2.079	2.000	1.447	2.894	3.009	4.000	4.323	4.158
11	2.079	1.699	1.431	2.432	2.976	2.886	4.323	3.532
12	2.079	1.398	1.398	1.954	2.907	1.954	4.323	2.907
13	2.380	2.000	1.204	2.408	2.866	4.000	5.665	4.760
14	2.380	1.699	1.176	1.998	2.799	2.886	5.665	4.044
15	2.380	1.398	1.146	1.602	2.728	1.954	5.665	3.327
Total	25.241	25.485	25.063	42.658	39.116	44.204	47.462	42.884

Fuente: Adaptado de Beltrán, 2011

Con base a un sistema de ecuaciones, Beltrán (2011) determina la Ecuación 8 de Intensidad- Duración –Periodo de retorno:

Ecuación 8. intensidad-duración-periodo

$$i = 631.095 \frac{T^{0.085}}{(d + c)^{0.613}}$$

Donde,
i= Intensidad de lluvia
T= Periodo de retorno
d= Duración

e) Cálculo de la red de drenaje pluvial.

Para dimensionar la tubería, se aplicaron las fórmulas de Manning y de continuidad, así como las variables hidráulicas establecidas en la normativa de la CEA. Las variables a considerar fueron:

- Velocidad mínima: 0.30 m/s calculada con el gasto de diseño.
- Velocidad máxima: 5.00 m/s calculada con el gasto de diseño y tubo de P.V.C.
- Tirante mínimo: 1.50 cm.
- Diámetro mínimo: 30 cm.

El nivel de descarga se encuentra por debajo de los niveles de arrastre de canales de riego existentes localizados alrededor del predio, por esta razón, se determinó que la red descargue en un cárcamo de bombeo que posteriormente enviará las aguas pluviales a uno de estos canales.

En la Tabla 33 se contempla el cálculo hidráulico de la Red de Drenaje Pluvial del fraccionamiento. Se puede observar el área de aportación y gastos de diseño de cada tramo, elevaciones de los arrastres y brocales de los pozos de visita, profundidad de los pozos, el diámetro y la pendiente de los tubos, así como la velocidad y tirante de cada tramo.

Tabla 33. Calculo hidráulico del Sistema Urbano de Drenaje convencional

CALCULO HIDRAULICO DE LA RED DE DRENAJE PLUVIAL																			
CONJUNTO URBANO "RANCHO BELLAVISTA", MUNICIPIO DE QUERETARO, EDO. DE QUERETARO																			
COEFICIENTE DE ESCURIMIENTO		$C = 0.50$ adimensional			COEFICIENTE DE RUGOSIDAD			$n = 0.009$ (tubería de PAD)											
PERÍODO DE RETORNO		$Tr = 10$ años																	
INTENSIDAD		$i = 361.095 \times (Tr^{0.085} / d^{0.613})$ mm/hr																	
AREA TOTAL DE APORTACIÓN		$A = 19.48$ ha																	
TRAMO	LONG.	AREA APORTACIÓN	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (DURACION)	INTENSIDAD	GASTO DE DISEÑO			% Capacidad	PEND.	DIAM.	FUNCIONAMIENTO HIDRAULICO				COTA DE RASANTE	COTA DE PLANTILLA	PROF. DEL POZO	CAIDAS	NOTA
					PROPIO	TRIBUTARIO	ACUMULADO				A TUBO LLENO		A TUBO PARCIALMENTE LLENO						
											GASTO	VELOC.	VELOC.	TIRANTE					
DE	A	(m)	(m ²)	(min)	(mm/hr)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(mil)	(cm)	(l/s)	(m/s)	(m/s)	(cm)	(m)	(m)	(m)		
	1A														1801.43	1800.23	1.20		
1A	1	11.0	12,161.99	15.00	83.50	141.05		141.05	89.61%	12.7	30.0	157.41	2.23	2.53	22.05	1801.46	1800.09	1.37	
1	2	41.0	6,074.74	15.39	82.20	69.36		210.41	75.33%	4.6	45.0	279.31	1.76	1.94	29.07	1801.25	1799.90	1.35	
2	2A	21.0	5,234.00	15.57	81.62	59.34		269.75	86.76%	5.7	45.0	310.92	1.95	2.22	32.18	1801.15	1799.78	1.37	
2A	3	21.0	2,758.04	15.73	81.09	31.07		300.81	89.24%	6.7	45.0	337.09	2.12	2.40	33.08	1801.30	1799.64	1.66	
3	4	43.0	5,668.17	16.01	80.22	63.16		363.97	89.28%	9.8	45.0	407.68	2.56	2.90	33.08	1801.10	1799.22	1.88	
4	5	42.0	7,466.76	16.32	79.30	82.24		446.21	89.79%	6.4	52.5	496.96	2.30	2.62	38.59	1801.25	1798.95	2.30	
5	6	43.0	6,505.49	16.59	78.51	70.94		517.15	89.77%	8.6	52.5	576.08	2.66	3.03	38.59	1801.12	1798.58	2.54	
6	6A	12.0	7,590.82	16.65	78.32	82.58		599.73	89.25%	11.7	52.5	671.93	3.10	3.52	38.59	1801.04	1798.44	2.60	
6A	7	30.0	1,658.14	16.86	77.73	17.90		617.63	89.90%	6.0	60.0	686.99	2.43	2.77	44.10	1801.16	1798.26	2.90	
7	8	29.0	8,378.40	17.03	77.25	89.90		707.53	89.75%	7.9	60.0	788.30	2.79	3.18	44.10	1800.98	1798.03	2.95	
8	9	15.0		17.12	77.00	0.00		707.53	89.19%	8.0	60.0	793.27	2.81	3.18	44.10	1800.76	1797.91	2.85	
9	12	44.0	4,590.52	17.47	76.06	48.50	67.76	823.78	87.86%	3.4	75.0	937.66	2.12	2.41	54.23	1800.58	1797.76	2.82	1
12	13	32.0	4,712.24	17.71	75.43	49.37		873.15	89.27%	3.7	75.0	978.15	2.21	2.51	55.13	1800.47	1797.64	2.83	
13	14	14.0	4,451.32	17.80	75.17	46.48		919.63	87.21%	4.3	75.0	1054.48	2.39	2.69	54.23	1800.54	1797.58	2.96	
14	15	47.0	4,445.43	18.12	74.35	45.91		965.54	89.51%	4.5	75.0	1078.72	2.44	2.77	55.13	1800.51	1797.37	3.14	
15	16	20.0	4,468.47	18.25	74.03	45.95		1011.49	88.96%	5.0	75.0	1137.07	2.57	2.91	55.13	1800.50	1797.27	3.23	
16	17	25.0	831.42	18.41	73.64	8.50		1019.99	87.96%	5.2	75.0	1159.59	2.62	2.95	54.83	1800.54	1797.14	3.40	
17	19	5.0		18.44	73.57	0.00	52.96	1072.95	86.14%	6.0	75.0	1245.60	2.82	3.17	53.63	1800.53	1797.11	3.42	2
19	33	43.0	925.97	18.69	72.96	9.38	542.99	1625.32	88.79%	4.9	90.0	1830.43	2.88	3.26	65.79	1800.47	1796.90	3.57	3
33	34	39.0	7,019.98	18.91	72.45	70.65		1695.97	88.26%	5.4	90.0	1921.55	3.02	3.40	65.79	1800.41	1796.69	3.72	
34	34A	15.0	3,340.98	18.99	72.27	33.54		1729.51	85.39%	6.0	90.0	2025.49	3.18	3.57	63.99	1800.35	1796.60	3.75	
34A	37	24.0	1,211.19	19.10	71.99	12.11	119.19	1860.81	86.94%	6.7	90.0	2140.38	3.36	3.82	64.35	1800.93	1796.44	4.49	4

Fuente: Adaptado de Beltrán, 2011

Tabla 33. (Continuación)

CALCULO HIDRAULICO DE LA RED DE DRENAJE PLUVIAL																			
CONJUNTO URBANO "RANCHO BELLAVISTA", MUNICIPIO DE QUERETARO, EDO. DE QUERETARO																			
COEFICIENTE DE ESCURIMIENTO		$C = 0.50$ <i>adimensional</i>			COEFICIENTE DE RUGOSIDAD		$n = 0.009$ (tubería de PAD)												
PERÍODO DE RETORNO		$Tr = 10$ años																	
INTENSIDAD		$i = 361.095 \times (Tr^{0.085} / d^{0.613})$ mm/hr																	
AREA TOTAL DE APORTACIÓN		$A = 19.48$ ha																	
TRAMO	LONG.	AREA APORTACIÓN	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (DURACION)	INTENSIDAD	GASTO DE DISEÑO			% Capacidad	PEND.	DIAM.	FUNCIONAMIENTO HIDRAULICO				COTA DE RASANTE	COTA DE PLANTILLA	PROF. DEL POZO	CAIDAS	NOTA
					PROPIO	TRIBUTARIO	ACUMULADO				A TUBO LLENO		A TUBO PARCIALMENTE LLENO						
DE	A	(m)	(m ²)	(min)	(mm/hr)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(mil)	(cm)	GASTO	VELOC.	VELOC.	TIRANTE	(m)	(m)	(m)		
						(l/s)	(l/s)	(l/s)			(l/s)	(m/s)	(m/s)	(cm)					
37	37A	7.0		19.14	71.92	0.00		1880.81	84.45%	7.1	90.0	2203.35	3.46	3.89	63.27	1800.93	1798.39	4.54	
37A	38	33.0		19.31	71.53	0.00		1880.81	88.95%	6.4	90.0	2091.82	3.29	3.71	66.15	1800.58	1798.18	4.40	
38	CB	5.0		19.33	71.48	0.00		1880.81	79.56%	8.0	90.0	2338.83	3.68	4.10	60.39	1800.57	1798.14	4.43	
	10															1801.17	1798.97	1.20	
10	11	22.0	1,908.71	15.00	83.50	22.14		22.14	70.88%	0.5	30.0	31.23	0.44	0.48	18.51	1801.28	1799.66	1.32	
11	9	27.0	3,963.51	15.19	82.87	45.62		67.76	39.87%	14.8	30.0	169.93	2.40	2.30	13.05	1800.76	1798.56	1.20	C=1.65
	18															1800.37	1798.17	1.20	
18	17	46.0	4,568.15	15.00	83.50	52.96		52.96	32.39%	13.7	30.0	163.49	2.31	2.06	11.76	1800.54	1798.54	2.00	C=1.40
	20															1801.41	1800.21	1.20	
20	21	45.0	2,795.95	15.00	83.50	32.43		32.43	35.00%	4.4	30.0	92.65	1.31	1.19	12.27	1801.21	1800.01	1.20	
21	22	21.0	2,188.05	15.20	82.83	25.15		57.58	45.80%	8.1	30.0	125.71	1.78	1.77	14.07	1801.04	1798.84	1.20	
22	23	5.0	2,202.29	15.25	82.65	25.28		82.66	76.59%	6.0	30.0	108.19	1.53	1.69	19.65	1801.05	1798.81	1.24	
23	24	33.0	4,938.58	15.43	82.07	56.27		139.13	63.64%	24.5	30.0	218.63	3.09	3.29	17.34	1800.90	1798.00	1.90	
24	25	55.0	10,505.28	15.93	80.46	117.41		256.54	88.99%	4.9	45.0	288.27	1.81	2.05	33.08	1800.98	1798.73	2.25	
25	26	32.0	8,252.54	16.15	79.80	91.47		348.01	88.59%	9.1	45.0	392.85	2.47	2.79	32.90	1801.13	1798.44	2.69	
26	29	34.0	2,201.79	16.47	78.85	24.11	60.78	441.91	88.08%	3.2	60.0	501.71	1.77	2.00	43.86	1801.10	1798.33	2.77	5
29	30	34.0		16.79	77.92	0.00		441.91	88.08%	3.2	60.0	501.71	1.77	2.00	43.86	1800.85	1798.22	2.63	
30	31	40.0		17.17	76.87	0.00		441.91	88.08%	3.2	60.0	501.71	1.77	2.00	43.86	1800.70	1798.09	2.61	
31	32	37.0		17.30	76.50	0.00		441.91	35.23%	20.0	60.0	1254.27	4.44	4.06	24.54	1800.56	1797.35	3.21	
32	19	8.0	9,521.55	17.33	76.43	101.08		542.99	35.35%	30.0	60.0	1536.17	5.43	4.99	24.54	1800.53	1797.11	3.42	C=0.00
	27															1801.28	1800.08	1.20	
27	28	29.0	3,819.27	15.00	83.50	44.30		44.30	56.96%	3.1	30.0	77.77	1.10	1.13	16.32	1801.19	1798.99	1.20	

Fuente: Adaptado de Beltrán, 2011

Tabla 33. (Continuación)

CALCULO HIDRAULICO DE LA RED DE DRENAJE PLUVIAL																			
CONJUNTO URBANO "RANCHO BELLAVISTA", MUNICIPIO DE QUERETARO, EDO. DE QUERETARO																			
COEFICIENTE DE ESCURIMIENTO		C = 0.50 <i>adimensional</i>			COEFICIENTE DE RUGOSIDAD		n = 0.009 (tubería de PAD)												
PERÍODO DE RETORNO		Tr = 10 años																	
INTENSIDAD		i = 361.095 x (Tr ^{0.085} / d ^{0.613}) mm/hr																	
AREA TOTAL DE APORTACIÓN		A = 19.48 ha																	
TRAMO	LONG.	AREA APORTACIÓN	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (DURACIÓN)	INTENSIDAD	GASTO DE DISEÑO			% Capacidad	PEND.	DIAM.	FUNCIONAMIENTO HIDRAULICO A TUBO PARCIALMENTE LLENO				COTA DE RASANTE	COTA DE PLANTILLA	PROF. DEL POZO	CAIDAS	NOTA
					PROPIO	TRIBUTARIO	ACUMULADO				A TUBO LLENO		A TUBO PARCIALMENTE LLENO						
DE	A	(m)	(m ²)	(min)	(mm/hr)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(mil)	(cm)	GASTO	VELOC.	VELOC.	TIRANTE	(m)	(m)	(m)		
						(l/s)	(l/s)	(l/s)			(l/s)	(m/s)	(m/s)	(cm)					
28	26	15.0	2,201.79	15.05	83.33	25.48		69.78	19.86%	63.3	30.0	351.42	4.97	3.97	8.91	1801.13	1799.04	2.09	C=0.80
	35															1800.87	1799.67	1.20	
35	36	38.0	2,297.29	15.00	83.50	26.64		26.64	13.49%	20.0	30.0	197.54	2.79	1.97	7.38	1800.61	1798.91	1.70	
36	34B	35.0	6,961.72	15.34	82.35	79.63		106.27	88.45%	7.4	30.0	120.16	1.70	1.92	21.93	1800.41	1798.65	1.76	
34B	34	7.0	1,132.00	15.41	82.14	12.92		119.19	92.01%	8.6	30.0	129.53	1.83	2.07	22.74	1800.41	1798.59	1.82	C=1.80
	39															1800.92	1800.02	0.90	
39	40	47.0	5,783.31	15.00	83.50	67.07		67.07	87.67%	3.0	30.0	76.51	1.08	1.23	21.69	1800.98	1799.88	1.10	
40	41	61.0		15.94	80.45	0.00		67.07	87.67%	3.0	30.0	76.51	1.08	1.23	21.69	1800.78	1799.70	1.08	
41	42	40.0		16.56	78.80	0.00		67.07	87.67%	3.0	30.0	76.51	1.08	1.23	21.69	1800.62	1799.58	1.04	
42	43	60.0		17.48	76.02	0.00		67.07	87.67%	3.0	30.0	76.51	1.08	1.23	21.69	1800.34	1799.40	0.94	
43	44	60.0	3,611.43	18.34	73.81	37.03		104.10	56.52%	2.0	45.0	184.17	1.16	1.20	24.08	1800.55	1799.28	1.27	
44	45	60.0		19.21	71.76	0.00		104.10	56.52%	2.0	45.0	184.17	1.16	1.20	24.08	1800.40	1799.16	1.24	
45	46	46.0	817.92	19.87	70.28	7.98		112.08	60.86%	2.0	45.0	184.17	1.16	1.22	25.25	1800.26	1799.07	1.19	
46	47	60.0	2,770.03	20.73	68.47	26.35		138.43	75.16%	2.0	45.0	184.17	1.16	1.27	29.07	1800.46	1798.95	1.51	
47	48	40.0		21.31	67.33	0.00		138.43	75.16%	2.0	45.0	184.17	1.16	1.27	29.07	1800.25	1798.87	1.38	
48	49	40.0		21.88	66.24	0.00		138.43	75.16%	2.0	45.0	184.17	1.16	1.27	29.07	1800.18	1798.79	1.39	
49	50	25.0	2,589.50	22.29	65.51	23.56		161.99	98.34%	1.6	45.0	164.73	1.04	1.18	36.18	1800.46	1798.75	1.71	
50	50A	47.0	2,402.13	22.96	64.50	21.52		183.51	84.21%	2.8	45.0	217.91	1.37	1.54	31.64	1800.58	1798.62	1.96	
50A	CB	6.0		22.87	64.48	0.00		183.51	9.00%	245.0	45.0	2038.40	12.82	7.77	9.27	1800.57	1797.15	3.42	C=1.01
	51															1801.95	1801.10	0.85	
51	52	60.0	3,426.36	15.00	83.50	39.74		39.74	89.97%	1.0	30.0	44.17	0.62	0.71	22.28	1802.19	1801.04	1.15	

Fuente: Adaptado de Beltrán, 2011

Tabla 33. (Continuación)

CALCULO HIDRAULICO DE LA RED DE DRENAJE PLUVIAL																				
CONJUNTO URBANO "RANCHO BELLAVISTA", MUNICIPIO DE QUERETARO, EDO. DE QUERETARO																				
COEFICIENTE DE ESCURIMIENTO				$C = 0.50$ <i>adimensional</i>				COEFICIENTE DE RUGOSIDAD				$n = 0.009$ (tubería de PAD)								
PERÍODO DE RETORNO				$Tr = 10$ años																
INTENSIDAD				$i = 361.095 \times (Tr^{0.085} / d^{0.613})$ mm/hr																
AREA TOTAL DE APORTACIÓN				$A = 19.48$ ha																
TRAMO	LONG.	AREA APORTACIÓN	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (DURACIÓN)	INTENSIDAD	GASTO DE DISEÑO			% Capacidad	PEND.	DIAM.	FUNCIONAMIENTO HIDRAULICO				COTA DE RA SANTE	COTA DE PLANTILLA	PROF. DEL POZO	CAIDAS	NOTA	
					PROPIO	TRIBUTARIO	ACUMULADO				A TUBO LLENO		A TUBO PARCIALMENTE LLENO							
											GASTO	VELOC.	VELOC.	TIRANTE						
DE	A	(m)	(m ²)	(min)	(mm/hr)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(mil)	(cm)	(l/s)	(m/s)	(m/s)	(cm)	(m)	(m)	(m)			
52	53	60.0		16.80	78.47	0.00		39.74	89.97%	1.0	30.0	44.17	0.62	0.71	22.26	1802.43	1800.98	1.45		
53	54	60.0		18.20	74.16	0.00		39.74	89.97%	1.0	30.0	44.17	0.62	0.71	22.26	1802.35	1800.92	1.43		
54	55	60.0		19.80	70.43	0.00		39.74	89.97%	1.0	30.0	44.17	0.62	0.71	22.26	1802.13	1800.86	1.27		
55	56	60.0	1,610.17	21.02	67.89	15.18		54.92	42.17%	1.0	45.0	130.23	0.82	0.79	20.34	1802.27	1800.80	1.47		
56	57	23.0		21.43	67.09	0.00		54.92	36.99%	1.3	45.0	148.48	0.93	0.86	18.99	1802.27	1800.77	1.50		
57	58	60.0		22.65	64.85	0.00		54.92	42.17%	1.0	45.0	130.23	0.82	0.79	20.34	1802.03	1800.71	1.32		
58	59	34.0	1,438.23	23.29	63.77	12.74		67.66	47.43%	1.2	45.0	142.66	0.90	0.89	21.74	1802.17	1800.67	1.50		
59	60	35.0		23.97	62.65	0.00		67.66	49.54%	1.1	45.0	136.59	0.86	0.86	22.32	1802.24	1800.63	1.61		
60	61	60.0		25.19	60.77	0.00		67.66	51.96%	1.0	45.0	130.23	0.82	0.82	23.09	1802.03	1800.57	1.46		
61	62	56.0	1,441.06	26.27	59.22	11.85		79.52	58.22%	1.1	45.0	136.59	0.86	0.89	24.66	1801.89	1800.51	1.38		
62	63	23.0		26.68	58.66	0.00		79.52	53.55%	1.3	45.0	148.48	0.93	0.96	23.27	1802.15	1800.48	1.67		
63	64	20.0		27.09	58.12	0.00		79.52	61.06%	1.0	45.0	130.23	0.82	0.86	25.43	1802.41	1800.46	1.95		
64	DES	16.0		27.39	57.73	0.00		79.52	55.74%	1.2	45.0	142.66	0.90	0.93	23.90	1802.21	1800.44	1.77		
	TOTAL	2,443.0	194,836.64																	
NOTAS:																				
1.- TRIBUTA DEL TRAMO 11-9																				
2.- TRIBUTA DEL TRAMO 18-17																				
3.- TRIBUTA DEL TRAMO 32-19																				
4.- TRIBUTA DEL TRAMO 36-34																				
5.- TRIBUTA DEL TRAMO 28-26																				

Fuente: Adaptado de Beltrán, 2011

II. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Con la finalidad de mantener en buen estado el sistema de drenaje pluvial convencional, resulta necesario elaborar un plan de mantenimiento preventivo, para lo cual se requiere contar con planos actualizados de las redes de drenaje en donde se especifiquen diámetros, profundidades, elevaciones de los brocales, sentidos de escurrimiento y la ubicación de las descargas de las aguas de lluvia. Con esta información se podrá elaborar un programa y un presupuesto anual de mantenimiento (CONAGUA, 2016).

El mantenimiento preventivo puede comprender las siguientes acciones:

- Inspección periódica mediante cámaras o sondeos de los elementos que componen la red de drenaje.
- Lavados y limpieza con equipo manual o hidroneumático.
- Acarreos.

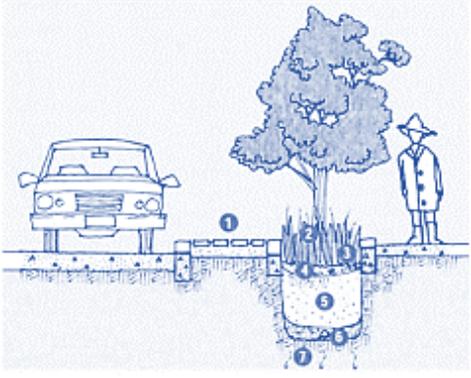
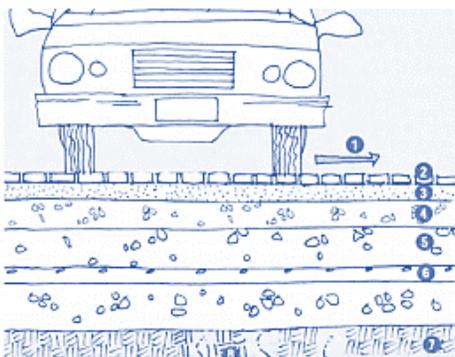
ANEXO 3. SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE

I. CONSTRUCCIÓN (Diseño del sistema)

En el presente apartado se presenta el diseño general del sistema urbano de drenaje sostenible para el Fraccionamiento Rancho Bellavista ubicado en la ciudad de Santiago de Querétaro, donde se consideran las características específicas del área de estudio.

El pavimento a implementar en el conjunto de VIS es de tipo continuo, es decir, se compone de una capa continua de asfalto poroso que permite pasar el agua a través de este. Para su diseño es necesario considerar las características del terreno. Para el caso del área de biorretención, se propone debido a que el suelo no es adecuado, y se insertan dentro de áreas impermeables, elementos ajardinados delimitados por bordillos, etc. En la Tabla 34 se pueden observar los elementos que componen cada uno de los SUDS.

Tabla 34. Características de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible para el fraccionamiento Rancho Bellavista

SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE		
Tipo	Elemento	Descripción
AREA DE BIORRETENCIÓN		
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bordillo adaptado para el paso del agua. 2. Vegetación. 3. Almacenamiento superficial 12 – 20 cm. 4. Acolchado de jardín. 5. Suelo preparado 15 – 120 cm. 6. Dren. 7. Infiltración. 	<p>Superficies ajardinadas que tratan el agua de lluvia mediante procesos de descontaminación biológica con la integración de elementos ajardinados.</p> <p>Se integran muy bien en aceras, viales, áreas residenciales y patios, entre otros.</p>
PAVIMENTO PERMEABLE		
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Escorrentía. 2. Pavimento permeable. 3. Gravas finas. 4. Gravas medias. 5. Capa de retención. 6. Drenaje. 7. Terreno natural 8. Infiltración. 	<p>Sistema de pavimentación y filtración del agua de lluvia en el terreno, siendo retenida den las capas sub-superficiales para su posterior reulizacion o evacuación.</p>

Fuente: Adaptado de SFPUC, 2009; Rodriguez, 2017, SFWATER, 2010

Para el dimensionamiento, se inicia determinando el caudal mediante el método racional, en el cual se simula la transformación de lluvia en escorrentía. La Ecuación 9 muestra como calcular el caudal.

Ecuación 9. Método racional

$$Q = \frac{CiA}{3600}$$

Donde,
 Q= Caudal en L/s
 C= Coeficiente de escorrentía
 i= Intensidad de lluvia en mm/h
 A= Área en m²

La distribución del SUDS en el Fraccionamiento Rancho Bellavista se puede visualizar en la Figura 11. En la Tabla 35 se muestran los gastos para el área de biorretención y el pavimento permeable.

Tabla 35. Cálculo de caudales para los Sistemas Urbano de Drenaje Sostenible

SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE				
Tipo	Área (m ²)	Coeficiente escorrentía	Intensidad (mm/h)	Caudal (L/s)
Área de biorretención	838.00	0.80	82.42	15.35
Pavimento permeable	18,853.00	0.80	82.42	345.30

Otro parámetro importante dentro del dimensionamiento es el espesor de ambos sistemas a implementar; para ello, se tomaron los rangos de valores establecidos en el manual de CIRIA (2001) y el manual de Minnesota Stormwater (2018). En las Tablas 36 y 37 se muestra el cálculo del volumen en relación con el área y espesor para el caso del pavimento permeable, así como los contenidos de masa para el área de biorretención.

Tabla 36. Área, espesor y volumen para el pavimento permeable

PAVIMENTO PERMEABLE			
Capa	Área (m ²)	Espesor (m)	Volumen (m ³)
Adoquín	18,853.00	0.08	1,508.24
Arena	18,853.00	0.05	942.65
Base granular	18,853.00	0.20	3,770.60
Grava	18,853.00	0.15	2,827.95
Geotextil	18,853.00	0.02	377.06
Total		0.50	9,426.50

Tabla 37. Área, espesor y volumen para el área de biorretención

ÁREA DE BIORRETENCIÓN			
Capa	Área (m ²)	Espesor (m)	Volumen (m ³)
Arena + materia orgánica / filtro medio	838.00	0.90	754.20
Semilla de pasto	838.00	0.00	0.00
Piedra	838.00	0.10	83.80
Corteza	838.00	0.15	125.70
Plántulas	838.00	0.20	167.60
Geotextil / capa transición	838.00	0.10	83.80
Total		1.45	1,215.10

Algunas consideraciones a tener en cuenta para las áreas de biorretención son:

- La entrada del agua debe ser diseñada para evitar la erosión en el área de biorretención.
- La superficie del sistema de biorretención depende de los requerimientos de almacenamiento de agua, pero generalmente no se debe superar una relación máxima de área impermeable a drenar/área del sistema de biorretención 5:1.
- El área de encharcamiento debe proporcionar suficiente superficie para almacenar el volumen de agua requerido sin exceder la profundidad de encharcamiento de diseño.
- Las pendientes de las superficies laterales deben ser graduales. En la mayoría de los casos, se recomiendan pendientes de 3:1 máximo.
- La profundidad recomendada de encharcamiento superficial es de 15 centímetros. Pero si las plantas seleccionadas tienen tolerancia al anegamiento, se pueden alcanzar los 45 cm.
- La profundidad de la mezcla de suelo debe estar generalmente entre los 45 y 120 cm si solamente se emplean especies herbáceas.
- El suelo de biorretención debe ser capaz de soportar una cubierta vegetal en buen estado; para ello, se les debe añadir material orgánico compostado hasta que alcance una proporción de entre un 5 y un 10%. Puede agregarse materia orgánica adicionalmente para aumentar la capacidad de retención de agua. Unas proporciones recomendadas para alcanzar una mezcla de suelo idónea, serían 20-40% de materia orgánica, entre 30-50% de arena y 20-30% de mantillo.
- La selección apropiada de la vegetación es esencial para que las zonas de biorretención sean eficaces. Usualmente, la vegetación autóctona de llanuras aluviales o de prados húmedos es la que mejor se adapta a las condiciones ambientales presentes en las áreas de biorretención.
- El lecho de arena debe tener un espesor aproximado entre 30 y 45 centímetros. La arena debe estar limpia y tener menos de un 6% de contenido en limos o arcillas.
- La profundidad del lecho de almacenamiento/infiltración subterránea, en caso de emplearse, debe ser de 15 cm mínima. Y en su construcción se debe colocar grava limpia, dejando un significativo espacio de huecos (de un 40%) para el almacenamiento de la escorrentía. Además, el lecho de gravas ha de estar envuelto en un geotextil.
(Herrería, 2014; SUDSostenible, 2016)

Recomendaciones para los pavimentos permeables:

- El área drenante debe ser inferior a las 4 Ha.
- La pendiente del perfil longitudinal no será superior al 5%. Es recomendable que la pendiente sea inferior al 2%.
- La distancia del fondo del pavimento con el nivel freático máximo estacional debe ser superior a 1,2 metros.
- Para evitar la colmatación del pavimento, los suelos de la cuenca de aportación deben tener un porcentaje de arcillas superior al 30%.
- Requieren una capa de conglomerado asfáltico u hormigón permeable de espesor comprendido entre 6 y 10 cm.
- Por debajo, se coloca una capa de gravilla que hace las veces de filtro. Esta gravilla debe ser de diámetro superior a 12 mm y se colocará en un espesor de entre 2.5 y 5.0 cm en la parte superior y de 5.0 cm en la inferior.
- Entre estas capas se sitúa la grava, que sirve para almacenar la escorrentía y luego distribuirla

- hacia el medio. Debe tener un diámetro entre 4.0 y 7.5 cm, y un índice de porosidad del 40%.
- Por debajo del firme, se dispondrá un geomembrana o geotextil resistente al punzonamiento; si se requiere.
(Herreria, 2014)

II. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

a) Pavimento permeable. Las actividades que se requieren para el mantenimiento de este tipo de pavimentos que ayudan a garantizar el rendimiento a largo plazo durante su vida útil, se enuncian a continuación:

- Limpieza rutinaria: implica limpieza del área de sedimentos o hojas sobre el pavimento cuando sea necesario.
- Limpieza profunda: consiste en combinar lavado a presión y aspiración sobre el pavimento al menos 2 veces al año.
- Inspección visual. Se recomienda realizar una inspección anual del terreno para evaluar su posible deterioro o desprendimiento.
(Minnesota Stormwater Manual, 2018; NRMCA, 2011)

b) Área de biorretención. Las acciones de mantenimiento permiten el correcto funcionamiento del área de biorretención. Para ello, se consideran las siguientes recomendaciones:

- Una vez transcurrido el primer año después de la siembra, se requiere de agua para la supervivencia de las distintas especies vegetales hasta que estas maduren.
- Es necesario realizar poda y maleza para mantener la apariencia, cuando se requiera.
- Limpieza del área en el cual se retire la basura y los escombros, además de las plantas muertas cuando sea necesario.
- Renovación del mantillo para reemplazar lo que se ha descompuesto, cuando se requiera.
- Reemplazo de vegetación cuando el porcentaje de cobertura de la vegetación aceptable sea inferior al 90% o no se cumplan los requisitos de desempeño específicos del proyecto.
- La vegetación herbácea, los árboles y los arbustos deben inspeccionarse para evaluar su salud y replantarse según corresponda para cumplir los objetivos del proyecto. En este sentido, se recomienda una frecuencia de una vez al año.
(Minnesota Stormwater Manual, 2018)

ANEXO 4. CONSIDERACIONES DE COSTOS

Para el inventario de costos en cada una de las etapas del ciclo de vida se tomó como base el Catálogo general de precios unitarios para la construcción de sistemas de agua potable y alcantarillado de CONAGUA (2017). Se consideran los siguientes conceptos:

- Trazo y nivelación de plazas, andaderos y parques con equipo de topografía, incluye: el suministro del material para señalamiento, la mano de obra, la herramienta y el equipo necesarios.
- Excavaciones por medios mecánicos, en terrenos seco y saturado, con extracción al nivel del terreno natural, incluye: el suministro de los materiales en la parte proporcional que le corresponda para las señales; la mano de obra para el apoyo en las operaciones mecánicas, afine de taludes y fondo de la zanja, limpieza, la maquinaria, la herramienta y el equipo necesarios.
- Camas con material de arena, tezontle o grava, para asiento de conductos, ejecutado a mano, incluye: los materiales puestos en el sitio de los trabajos, desperdicios; la mano de obra para el acarreo libre horizontal y vertical, extendido, nivelación, compactación, retiro del material sobrante, limpieza, la herramienta y el equipo necesarios para la correcta ejecución de los trabajos.
- Relleno compactado acostillado de material producto de la excavación en zanja.
- Suministro, instalación y pruebas de tubos de polietileno alta densidad, corrugado, de doble pared, con campana bicapa integrada y empaque, para drenaje, marca Tododren o similar, incluye: los materiales la mano de obra, la herramienta, y los equipos necesarios.
- Construcción de pozo de visita acabado común, sobre tubo, incluye: el tabique rojo recocido, el concreto, el mortero, acero de refuerzo, escalones, brocal, tapa, madera; la mano de obra para el trazo, nivelación, fabricación y colocación del mortero y concreto, el tabique, aplanado interior, acabado pulido, el habilitado y colocación del acero, la madera, el brocal, limpieza, la herramienta y el equipo necesarios para la correcta ejecución de los trabajos.
- instalación de coladeras de piso o de banquetas, con brocal de concreto o fierro fundido, incluye: el mortero cemento arena 1:3, la mano de obra para la instalación, emboquillado, el equipo y la herramienta necesarios para la correcta ejecución de los trabajos
- Demoliciones de pavimentos de concreto por medios mecánicos, incluye: la mano de obra, la maquinaria, la herramienta y el equipo necesarios, (medido colocado).
- Desmantelamiento de tubos para bajadas de aguas negras, pluviales o descargas de muebles sanitarios, incluye: la mano de obra, la herramienta, andamios y los equipos necesarios.
- Carga por medios manuales y acarreo en camión volteo de materiales producto de extracción de bancos, cortes, excavaciones, demoliciones, piedra, tala de árboles, materiales procesados, a primera estación de un kilómetro y estaciones subsecuentes a la primera, en zonas urbana, suburbana y carretera, descarga, incluye: la mano de obra, la herramienta, la maquinaria y el equipo necesarios.
- Pavimentos de concreto permeable ecológico, con aditivo Permeacret o similar, suministrado por proveedor, incluye: los materiales, la mano de obra para la preparación de la superficie, colocación del concreto, la herramienta y el equipo necesarios para la correcta ejecución de los trabajos.

- Suministro y plantación de árboles, arbustos, plantas de ornato con las características solicitadas, en el sitio de los trabajos, incluye: agua, reposición, el acarreo libre, preparación de la superficie, trazo, excavación, plantación, relleno, riego, conservación y mantenimiento durante 45 días o lo que se establezca en el contrato a partir de la plantación, la mano de obra, limpieza, el equipo y la herramienta necesarios para la correcta ejecución de los trabajos.
- Desyerbe y limpia del terreno por medios manuales, incluye: el acarreo libre dentro del sitio de los trabajos o a pie de camión volteo, limpieza, la herramienta y el equipo necesarios.