



Sustainable**Solutions**
CORPORATION



Presidente, Panel de revisión de expertos independientes

Análisis del ciclo de vida de las tuberías de PVC/Normas ISO Serie 14040 y declaración de producto ambiental/Norma ISO 14025



Se verificó la conformidad del análisis del ciclo de vida con la norma de categoría del producto e ISO 14025

ABRIL DE 2017

ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LAS TUBERÍAS DE AGUA Y ALCANTARILLADO DE PVC Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA SUSTENTABILIDAD DE LOS MATERIALES DE LAS TUBERÍAS

Este estudio evalúa la infraestructura de tuberías subterráneas en el marco de proveer servicios sustentables de agua y alcantarillado durante un período de 100 años: (1) con un mínimo riesgo de degradación de la calidad del agua; (2) al tiempo que reduce los costos de operación, mantenimiento y reparación; y (3) teniendo en cuenta las variables que pueden influir en el rendimiento de la tubería y las expectativas del nivel de servicio. El informe también proporciona datos relevantes que pueden ayudar a los funcionarios de servicios públicos con sus planes de gestión de activos y evaluaciones de costos del ciclo de vida para los diferentes materiales de las tuberías.



PRÓLOGO

Este 2017 el análisis del ciclo de vida de las tuberías de agua y alcantarillado de PVC y el análisis comparativo de sustentabilidad de los materiales para tuberías constituye el primer estudio ambiental integral de los sistemas de tuberías subterráneas en América del Norte, basándose en una metodología de análisis del ciclo de vida de 100 años. El examen general incluye un estudio de las tuberías de cloruro de polivinilo (PVC) realizado de acuerdo con la serie de normas ISO 14040 de análisis de ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés), y la posterior publicación de una Declaración ambiental del producto (EPD, por sus siglas en inglés) de las tuberías de PVC, que cumple con las normas ISO 14025 y fue certificada de manera independiente por NSF International.

El propósito de este estudio es proporcionar una revisión exhaustiva de los datos del LCA e informar de forma transparente los resultados del LCA sobre las tuberías de PVC a las industrias de agua, alcantarillado sanitario y drenaje de aguas pluviales.

El LCA y la EPD de las tuberías de PVC apoyan los objetivos y la visión de la Política de sustentabilidad de la infraestructura hídrica para el agua potable limpia y segura de la Agencia de protección ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) de EE. UU. de 2010 y del Programa hídrico nacional de la EPA sobre el Cambio climático de EE. UU. de 2015 para garantizar la sustentabilidad a largo plazo de la infraestructura hídrica. Este estudio también contiene un examen comparativo de los productos competidores para tuberías correspondientes, que se basa en la información disponible al público sobre dichas opciones alternativas de tuberías.

El LCA de las tuberías de PVC estuvo sujeto a una revisión crítica de un panel internacional de expertos en evaluación de ciclos de vida. Acorde a los resultados del LCA en las tuberías de PVC, las tuberías de PVC ofrecen ventajas ambientales y económicas para solucionar las necesidades de infraestructura hídrica y de alcantarillado para los servicios públicos y proyectos municipales. El LCA y la investigación realizada para este estudio muestran que el PVC tiene menos impacto ambiental desde la perspectiva del ciclo de vida y el impacto ecológico: menor energía incorporada, menor energía en la fase de uso y atributos de vida más largos en comparación con otros materiales para tubería. Es importante para los ingenieros y los funcionarios municipales comprender todos los aspectos del ciclo de vida de los materiales de las tuberías y utilizar los datos actuales y completos para evaluar los impactos ambientales del ciclo de vida de la infraestructura de tuberías. Este informe se presenta en un momento en el que el envejecimiento de la infraestructura de tuberías, la corrosión de los materiales en las tuberías subterráneas y los problemas de calidad del agua son inminentes, y resalta los desafíos significativos de la infraestructura hídrica y aguas residuales de la nación.

Sustainable Solutions Corporation (SSC) es una firma reconocida como un experto en análisis de ciclo de vida y diseño y análisis de productos sustentables. Para asegurar la transparencia de la industria, Uni-Bell PVC Pipe Association encargó a SSC que realice un LCA independiente para tuberías de PVC utilizadas comúnmente para el agua potable, el alcantarillado sanitario y tuberías de alcantarillado pluvial que cubra el sector del mercado de las tuberías rígidas de PVC de 4" a 60". Las tuberías representadas en este estudio se fabrican en los EE. UU. y Canadá utilizando un estabilizador a base de estaño. Las tuberías de PVC rígidas fabricadas en América del Norte no contienen ftalatos, plomo ni cadmio. El LCA de la industria de tuberías de PVC de América del Norte y la publicación de la EPD de las tuberías de PVC proporcionan una total transparencia sobre los impactos del ciclo de vida y los beneficios de las tuberías de PVC.



SUSTAINABLE SOLUTIONS CORPORATION

RESUMEN EJECUTIVO

BREVE RESEÑA

Este informe sobre el *análisis del ciclo de vida de las tuberías de agua y alcantarillado de PVC y el análisis comparativo de la sustentabilidad de los materiales de las tuberías* incluye:

- ▶ Un examen exhaustivo del análisis del ciclo de vida (LCA) de una tubería de PVC en siete productos de tuberías
- ▶ Comparaciones con otros materiales para tubería en lo referido a sus atributos de rendimiento y durabilidad
- ▶ Otros temas de sustentabilidad

ANTECEDENTES: ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (LCA) DE LAS TUBERÍAS DE PVC

Uni-Bell PVC Pipe Association (PVCPA, por sus siglas en inglés) encargó un LCA en siete tuberías de PVC en tres segmentos del mercado (tubería de presión de agua potable, tubería de alcantarillado sanitario por gravedad y tubería de drenaje por gravedad). Las tuberías por gravedad incluían tanto productos de pared sólida como productos de perfil de pared. Los objetivos del LCA fueron los siguientes:

- ▶ Determinar los impactos relacionados con la energía de “principio a fin” para las siete tuberías de PVC
- ▶ Comparar estos resultados con la información a disposición del público en los productos competidores

El LCA se llevó a cabo por Sustainable Solutions Corporation (SSC), una empresa especializada en el análisis del ciclo de vida y el diseño y el análisis de productos sustentables.

TRANSPARENCIA DEL LCA

Para asegurar que el LCA fuese transparente:

- ▶ Metodología: el LCA se llevó a cabo según las normas de análisis del ciclo de vida de la Organización Internacional de Estandarización (ISO, por sus siglas en inglés): la serie ISO 14040.
- ▶ Revisión por pares: el LCA fue revisado críticamente por un panel de expertos independientes en materia de sustentabilidad. Los revisores fueron: Rita Schenck (Instituto para la Investigación y Educación Ambiental), Nigel Howard (Clarity Environment) y Charlie He (Carollo Engineers).



PRINCIPALES HALLAZGOS DEL LCA

El LCA encontró que el PVC tiene impactos menores en su ciclo de vida en la mayoría de las categorías que los materiales alternativos analizados. Las áreas de estudio incluyeron:

- ▶ Producción y transporte de materias primas
- ▶ Producción, transporte e instalación de tuberías
- ▶ Se analizó y se informó por separado la fase de uso de las tuberías (incluidos el mantenimiento, la reparación y la sustitución)
- ▶ Fase de fin de vida útil de las tuberías

Teniendo en cuenta los resultados del LCA y las comparaciones basadas en las publicaciones de los productos de tuberías competidores, las tuberías de PVC proporcionan una ventaja competitiva para la mayoría de las aplicaciones de las tuberías.

INFORMACIÓN ADICIONAL

Este informe tiene como objetivo explicar el LCA, los datos obtenidos de las tuberías de PVC y las comparaciones realizadas en base a otros materiales para tubería. Además, este estudio examina los temas importantes que ayudarán a los servicios públicos a evaluar mejor el rendimiento y la idoneidad de los diferentes materiales para tuberías, tales como:

- ▶ Salud y seguridad
- ▶ Calidad del aire y el agua
- ▶ Impactos monetarios de las fugas, la corrosión interna y la corrosión externa de las tuberías

GLOSARIO DE TÉRMINOS



POTENCIAL DE ACIDIFICACIÓN: tendencia de un producto químico a formar iones acidificantes H⁺ que degradan el medio ambiente natural.

FRAGILIDAD: que tiene dureza y rigidez, pero poca resistencia a la tracción.

DE LA CUNA A LA PUERTA: análisis parcial del ciclo de vida de un producto desde la extracción del recurso (“cuna”) hasta el producto fabricado en la fábrica (“puerta”). Se omiten las fases de transporte, instalación, uso y disposición del producto.

DE PRINCIPIO A FIN: análisis completo del ciclo de vida de un producto desde la extracción del recurso (“principio”) pasando por las fases de uso y disposición (“fin”).

DE LA CUNA A LA INSTALACIÓN: análisis parcial del ciclo de vida de un producto desde la extracción de recursos (“cuna”), la producción, el transporte al sitio y la instalación. Se omiten las fases de uso y eliminación del producto.

DEMANDA DE ENERGÍA ACUMULADA (CED, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS): la suma de todas las fuentes de energía extraídas directamente de la tierra, tales como el gas natural, petróleo, carbón, biomasa o energía hidroeléctrica utilizada para producir un producto. Otro término para referirse a energía incorporada.

CICLO DE VIDA DISEÑADO: período de tiempo durante el cual se espera que el sistema de tuberías opere dentro de los parámetros especificados por sus diseñadores.

DECLARACIÓN AMBIENTAL DEL PRODUCTO (EPD, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS): un documento verificado y registrado de forma independiente que comunica información transparente y comparable sobre el impacto ambiental del ciclo de vida de los productos; también conocido como “Declaraciones Ambientales Tipo III”.

ENERGÍA INCORPORADA: la suma de todas las fuentes de energía extraídas directamente de la tierra, como gas natural, petróleo, carbón, biomasa o energía hidroeléctrica utilizada para producir un producto. Otro término para referirse a la demanda de energía acumulada.

POTENCIAL DE EUTROFIZACIÓN: medida relativa de los niveles de compuestos de fósforo y nitrógeno liberados a las aguas continentales.

FALLA: cuando una tubería no realiza su función de diseño, ya sea estructural o hidráulicamente (por fuga excesiva o capacidad de flujo reducida).

CARGA DE ALIMENTACIÓN ENERGÉTICA: potencial de energía de la materia prima contenida dentro del producto.

POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL: medida relativa de la cantidad de calor que contienen los gases de efecto invernadero en la atmósfera.

CICLO DE VIDA: una serie de etapas por las que un producto, proceso o servicio pasa durante su vida útil.

ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (LCA): técnica para identificar los impactos ambientales asociados con un producto, proceso o servicio durante su vida útil. Por el contrario, el cálculo del costo del ciclo de vida (LCC, por sus siglas en inglés) se centra en los costos monetarios.

CÁLCULO DEL COSTO DEL CICLO DE VIDA (LCC): método para evaluar los costos monetarios involucrados con un producto, proceso o servicio durante su vida útil. Por el contrario, el LCA se centra en los impactos ambientales.

POTENCIAL DE AGOTAMIENTO DE OZONO: cantidad relativa de degradación de la capa de ozono de la Tierra que un compuesto químico puede causar.

VIDA FÍSICA: tiempo durante el cual el sistema de tuberías se puede utilizar (no necesariamente económicamente).

REGLA DE CATEGORÍA DEL PRODUCTO (PCR, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS): conjunto de requisitos y directrices específicos para el desarrollo de una Declaración Ambiental del Producto (EPD).

ENERGÍA INCORPORADA RECURRENTE: energía consumida para mantener, reparar, restaurar, renovar o sustituir los materiales, componentes o sistemas durante el uso de las tuberías.

VIDA DE SERVICIO: tiempo durante el cual un producto, proceso o servicio funciona dentro de los parámetros especificados, es decir, se basa en el rendimiento.

POTENCIAL DE GENERACIÓN DE OZONO FOTOQUÍMICO (“SMOG”): contribución relativa de un compuesto químico a la formación de ozono a nivel del suelo (“smog”) en un espacio aéreo.

DEFORMACIÓN POR FLUENCIA: característica de algunos materiales para tuberías en los cuales las tuberías sometidas a una carga continuarán deformándose lentamente con el tiempo.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO

Glosario de términos

1.0	Principales hallazgos del LCA de las tuberías de PVC y revisión de sustentabilidad de los atributos de las tuberías	12
1.1	El LCA de las tuberías de PVC cumple con la normativa ISO y la EPD de las tuberías de PVC proporciona un detalle transparente de los impactos ambientales	12
1.2	Las suposiciones de la vida útil de las tuberías son críticas en el Análisis del Ciclo de Vida	13
1.3	La calidad del agua constante a largo plazo es un requisito de sustentabilidad crítico durante la vida útil de las tuberías	14
1.4	La fabricación es una importante etapa del ciclo de vida: Considerar materiales para tuberías que utilizan un proceso de fabricación eficiente con emisiones mínimas para el medio ambiente	14
1.5	El transporte y la instalación del material de las tuberías tiene un impacto significativo en el costo del ciclo de vida y el impacto ecológico	15
1.6	El consumo de energía para el bombeo provoca un costo y un impacto significativos durante la vida del sistema de tuberías	15
1.7	Las tuberías de PVC proporcionan un ahorro significativo del costo de bombeo de agua y la capacidad de alcantarillado durante una vida útil de 100 años	16
1.8	La gestión de finalización de la vida útil es una consideración importante del ciclo de vida	16
1.9	Los LCA de las tuberías de PVC en todo el mundo proporcionan hallazgos similares	17
2.0	Infraestructura hídrica sustentable	18
2.1	Antecedentes	18
2.2	Tubería de PVC en América del Norte	18
2.2.1	La norma 61 de la certificación NSF/ANSI para las tuberías de PVC verifica que no hay lixiviación de cloruro de vinilo	19
2.2.2	Duración de las tuberías de PVC	19
2.3	Redefinición de la sustentabilidad y la calidad del agua	19
2.3.1	Características de las tuberías sustentables	20
3.0	Introducción al análisis del ciclo de vida (LCA)	21
3.1	Objetivos del análisis del ciclo de vida	22
3.2	Aspectos clave de la metodología de las Normas ISO para el LCA de las tuberías de PVC	22
3.3	Panel de revisión de expertos independientes	22
3.4	Descripción de la estimación del costo del ciclo de vida	23
3.5	Unidades funcionales de 100 pies recomendadas por la industria	23
3.6	Cobertura de la industria	24

4.0	Evaluación del impacto del ciclo de vida	25
4.1	Definiciones y resultados de la evaluación del impacto ambiental TRACI	25
4.2	Demanda de energía acumulada (energía incorporada)	26
4.3	Emisiones de gases de efecto invernadero (Potencial de Calentamiento Global) e impactos ambientales de las TRACI	27
5.0	Tubería de cuna-a-puerta	30
5.1	Extracción y producción de materias primas	30
5.1.1	Informe de emisiones	30
5.2	Producción de tuberías	32
5.3	Materiales reciclados	33
6.0	Instalación de tuberías	34
6.1	Distribución de las tuberías	34
6.2	Impactos ambientales potenciales de la instalación de tuberías	34
7.0	Etapas de uso y rendimiento de las tuberías de PVC	36
7.1	Vida útil de la tubería con un estándar de comparación de 100 años	36
8.0	Revisión de los materiales de las tuberías alternativas	38
8.1	Metodología de investigación y suposiciones	38
8.2	Análisis de los factores que afectan la vida útil de las tuberías	38
8.3	Selecciones de materiales para tuberías utilizados para comparaciones	38
8.4	Vida útil de las tuberías subterráneas	40
8.4.1	Vida útil de cada material de las tuberías	41
8.4.2	Vida útil de 100 años para las tuberías de PVC	42
8.5	Factores que influyen en la vida útil de las tuberías de agua	42
8.5.1	Corrosión externa	42
8.5.2	Corrosión interna	43
8.6	Riesgo de corrosión y calidad del agua	44
8.6.1	La corrosión de las tuberías de hierro fundido con juntas de plomo: Un problema para la calidad del agua y la salud pública	44
8.7	Corrosión interna y pérdida de energía	44
8.7.1	Diámetros internos de las tuberías	44
8.7.2	Factores de fricción de las tuberías	44
9.0	Atributos ambientales y de rendimiento de los materiales de conducción alternativos	48
9.1	Tuberías de hierro dúctil (DI)	48
9.1.1	Vida útil de las tuberías de hierro dúctil (DI)	48
9.1.2	LCA de hierro dúctil (DI) y energía incorporada	49
9.1.3	Rendimiento de la etapa de uso de las tuberías de hierro dúctil (DI)	50
9.2	Tuberías de concreto	51
9.2.1	Vida útil de la tubería de concreto no reforzado (NRCP)	51
9.2.2	Tiempo de vida útil de las tuberías de cilindro de concreto pretensado (PCCP)	52
9.2.3	Rendimiento de la etapa de uso de las tuberías de concreto no reforzado (NRCP)	52
9.2.4	Rendimiento de la etapa de uso de las tuberías con cilindro de concreto pretensado (PCCP)	52
9.3	Tuberías de polietileno y polipropileno	53

9.3.1	Vida útil de las tuberías de polietileno (HDPE)	53
9.3.2	Energía incorporada de la tubería de polietileno (HDPE)	54
9.3.3	Rendimiento de la etapa de uso de las tuberías de polietileno (HDPE)	54
9.3.4	Vida útil de tuberías de polipropileno (PP)	54
9.3.5	Rendimiento del uso-etapa de tuberías por gravedad para perfil de pared de polietileno de alta densidad (HDPE) y polipropileno (PP)	54
9.4	Tuberías de arcilla	55
9.4.1	Vida útil de las tuberías de arcilla vitrificada (VCP)	55
9.4.2	Energía incorporada en tuberías de arcilla vitrificada (VCP, por sus siglas en inglés)	55
9.4.3	Rendimiento uso-etapa de tuberías de arcilla vitrificada (VCP, por sus siglas en inglés)	56
9.5	Resumen de atributos ambientales y desempeño de materiales alternativos de tuberías	57

10.0	Ahorro de energía de bombeo en tuberías de PVC	58
10.1	Ahorro en el costo de energía de bombeo en tuberías de PVC	58
10.2	Impacto ecológico de baja monetización de tuberías de PVC	60

11.0	Normas de sustentabilidad	62
11.1	Infraestructura sustentable y calificaciones	62
11.1.1	Instituto de Infraestructura Sustentable (ISI, por sus siglas en inglés): Envision™	62
11.1.2	Certificación SMaRT	64

12.0	Resumen de las conclusiones - Energía incorporada y sustentabilidad	65
12.1	Resumen de conclusiones para comparaciones totales de energía incorporada en 100 años para tuberías de presión y por gravedad	65
12.1.1	Comparaciones de energía incorporada total de tuberías de presión	65
12.1.2	Comparaciones de energía incorporada total de tuberías por gravedad	68

13.0	Conclusiones	72
13.1	Resumen de los resultados y las conclusiones del análisis del ciclo de vida	72

APÉNDICE

Tubería de presión	73
Roturas de tuberías principales	73
Pérdida de agua en tuberías de presión	74
Tubería de presión: Cálculos de energía hidráulica	76
Tubería de presión: Cálculos de energía incorporada total	77
TUBERÍA POR GRAVEDAD	80
Cálculos de energía incorporada total de tuberías por gravedad	80
Flujos de infiltración	84
RESUMEN DE ENERGÍA INCORPORADA EN EL MATERIAL DE LA TUBERÍA	84
COMPARACIONES DE ENERGÍA DE BOMBEO DURANTE UN CICLO DE VIDA DE 100 AÑOS	85
Energía total de 100 años de bombeo: Costos en el tiempo utilizando tuberías con distinta vida útil	88
Comparaciones del costo del ciclo de vida durante un ciclo de vida de 100 años	90
ESTUDIO DE FALLOS EN TUBERÍAS DE HIERRO FUNDIDO (CI) Y HIERRO DÚCTIL (DI) EN TUBERÍAS PRINCIPALES DE AGUA	90
Hierro fundido bruto	90
Hierro fundido gris	90
La vida útil del hierro dúctil es de menos de 50 años	90
Las tuberías de hierro dúctil tienen paredes más delgadas	91

CORROSIÓN, LIXIVIACIÓN Y RIESGOS EN LA CALIDAD DEL AGUA DE LAS TUBERÍAS DE HIERRO	91
Al utilizar tuberías de hierro, se usan más productos químicos (inhibidores de corrosión) para el agua potable	91
El revestimiento de cemento es una posible fuente de lixiviación de metales pesados	91
Hierro y manganeso provenientes de las tuberías de hierro	92
Implicaciones de la selección de tuberías	92
Efectos en la salud	94
La corrosión de las tuberías de hierro y los problemas de la calidad del agua en Flint	94
El pH del agua de origen puede cambiar	95
Estudio de caso comparativo del análisis del ciclo de vida de las tuberías de alcantarillado	95

REFERENCIAS

PRINCIPALES HALLAZGOS DEL LCA DE LAS TUBERÍAS DE PVC Y REVISIÓN DE SUSTENTABILIDAD DE LOS ATRIBUTOS DE LAS TUBERÍAS

El análisis del ciclo de vida de las tuberías de agua y alcantarillado de PVC y el estudio comparativo de sustentabilidad de los materiales para tuberías combina dos componentes principales del análisis de sustentabilidad. En primer lugar, este estudio documenta la acumulación de energía incorporada de las tuberías de PVC para cada una de sus etapas del ciclo de vida de principio a fin. Esto crea una plataforma común para discutir y comparar aspectos del impacto ecológico del producto y sus impactos ambientales en términos científicos.

El segundo componente tiene en cuenta los elementos que pueden influir en el rendimiento de las tuberías y las expectativas del nivel de servicio. Mientras que los fabricantes sugieren una esperanza de vida de las tuberías teniendo en cuenta las pruebas y procesos de fabricación, los servicios públicos suelen elegir una vida útil diferente en el entorno instalado. La vida útil se determina por las características de diseño, las condiciones de operación, las condiciones ambientales dentro y fuera de las tuberías, y el uso previsto. Este estudio reconoce este hecho y desarrolla una vida útil basada en el rendimiento para cada material para tubería. Esta vida útil basada en el rendimiento en el entorno instalado se centra en la capacidad de las tuberías para entregar un nivel constante de agua de alta calidad de manera rentable. Con el fin de lograr esto, se consideraron los principales materiales de las tuberías y las variables ambientales y de sustentabilidad. Esto incluye una revisión en profundidad de los dos materiales para tuberías de agua más comunes, PVC y hierro dúctil, así como los atributos específicos de otros materiales para tubería. La sustentabilidad, en términos de calidad de agua constante y entrega mediante la infraestructura de tuberías subterráneas, incluye las variables de riesgo de corrosión, efectos del clima y costos de energía. Al determinar la vida útil de un material de tuberías, se utiliza un sistema de vida útil prevista de 100 años. Cuando todos estos elementos se combinan, se pueden aplicar los costos monetarios para comparar mejor los resultados. A continuación se proporcionan los aspectos más destacados de los principales hallazgos del estudio global.

1.1 El LCA de las tuberías de PVC cumple con la normativa ISO y la EPD de las tuberías de PVC proporciona un detalle transparente de los impactos ambientales

- ▶ El LCA de las tuberías de PVC proporciona un análisis del ciclo de vida completo y transparente y una revisión de la sustentabilidad para la industria del agua y de alcantarillado de América del Norte.
- ▶ El LCA de las tuberías de PVC contiene las etapas del ciclo de vida de principio a fin necesarias que incluyen:
 - ▷ Extracción y procesamiento de las materias primas
 - ▷ Fabricación
 - ▷ Transporte y distribución
 - ▷ Instalación, uso y mantenimiento
 - ▷ Reciclaje y eliminación final
- ▶ Mediante la inclusión de los impactos en todo el ciclo de vida del producto, el LCA ofrece una visión completa de los aspectos ambientales asociados con el producto y una imagen precisa de las ventajas y desventajas ambientales en la selección de productos.
- ▶ El análisis del ciclo de vida de las tuberías se basa en una referencia mínima de vida útil prevista de 100 años debido a la muy larga vida útil de la infraestructura de tuberías.
- ▶ El LCA es un análisis más exhaustivo y transparente de los impactos ambientales de un producto a lo largo de su vida y es un indicador mucho mejor del rendimiento ambiental que los presuntos atributos individuales como el contenido reciclado. Algunos materiales, como el metal, requieren grandes cantidades de energía para reciclarlos; y en el proceso hacen emisiones tóxicas adicionales en comparación con la producción de metal primario no reciclado.

- ▶ La Certificación SMaRT del Instituto para la Transformación del Mercado hacia la Sustentabilidad para tuberías de hierro dúctil y gres vitrificado (VCP, por sus siglas en inglés) no proporciona una total transparencia para la certificación ambiental.
- ▷ No se proporciona información ambiental sobre el ciclo de vida de los productos, evitando la comparación con otros materiales para tubería.
- ▷ Sin la divulgación clara de los datos de impacto ambiental, no está claro si los tratamientos de mitigación de la corrosión de las tuberías de hierro dúctil, como el revestimiento de cemento y otros aditivos para reducir la corrosión, se incluyen en el análisis o la certificación de las tuberías.
- ▷ La Certificación SMaRT requiere que no se produzcan dioxinas durante la fabricación. Sin embargo, la fabricación de tubería de hierro dúctil produce dioxinas.

1.2 Las suposiciones de la vida útil de las tuberías son críticas en el Análisis del Ciclo de Vida

- ▶ Al evaluar la sustentabilidad de los productos de las tuberías para el ciclo de vida previsto, es importante comprender y evaluar los impactos del ciclo de vida de todos los materiales utilizados en el sistema de tuberías.
- ▶ Este estudio del LCA de las tuberías de PVC respalda los esfuerzos de las mejores prácticas y conceptos de gestión de activos que se esfuerzan por reducir los costos del ciclo de vida de los activos del agua, el alcantarillado y el drenaje pluvial subterráneo, manteniendo el rendimiento y los niveles de servicio fiables, protegiendo la calidad del agua y reduciendo al mínimo las roturas de las tuberías de abastecimiento de agua, la pérdida e infiltración de agua y las reparaciones del pavimento.
- ▶ Los fabricantes de tuberías comercializan diversos materiales para tuberías con una vida útil estimada. Esta vida útil “estimada” no representa el punto en el que el rendimiento de las tuberías puede empezar a fallar en el cumplimiento de los niveles de servicio previstos.
- ▶ Este estudio considera la diversa bibliografía y la vida estimada de las tuberías de los fabricantes y además incorpora la evidencia práctica de las tendencias a fallar de las tuberías de la industria y los estudios de excavación para atribuir un plazo real de vida útil de las tuberías que se utilizará durante el período de evaluación de 100 años.
 - ▷ Por ejemplo, las tuberías de hierro se han utilizado en sistemas de distribución de agua durante más de 100 años. Con hasta un 80 % de pérdida de agua, la vida útil de servicio práctico de las tuberías había expirado décadas atrás. Cuando una tubería opera más allá de su vida útil, los resultados son: mayores costos para el tratamiento y el bombeo del agua, aumento en las facturas de agua del cliente, más reclamos por daños a la propiedad, y un riesgo tanto para la calidad del agua del cliente como para la confianza de los funcionarios públicos.
- ▶ Este estudio proporciona algunos ejemplos de vida útil de 50, 75 y 100 años para ayudar a los operadores de servicios públicos a comprender los ejemplos del modelo utilizado en este estudio.
- ▶ A las tuberías de PVC se les asigna una vida útil de 100 años en base a 60 años de experiencia, estudios extensos de la industria, muestras de campo de excavaciones y datos históricos que demuestran los bajos índices de falla y las roturas principales de las tuberías de abastecimiento de agua.
- ▶ Un estudio hecho sobre tuberías de alcantarillado de PVC desenterradas estima una vida útil de entre 100 y 300 años.
- ▶ Las tasas de rotura de las tuberías de PVC se reducen con el tiempo, mientras que los fallos en las tuberías de hierro propensos a la corrosión y las de hormigón aumentan con el tiempo, lo que ocasiona mayores costos de operación y de mantenimiento.
- ▶ Teniendo en cuenta los datos de la bibliografía existente y las tendencias de fallo de las tuberías de la industria, no se espera que las tuberías de hierro dúctil (DI) y las tuberías de polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés) con paredes más delgadas duren 100 años debido a la corrosión interna/externa y la deformación por oxidación/fluencia, respectivamente.
 - ▷ Por ejemplo, a las tuberías de fundición de pared gruesa se les suele asignar una vida útil física de 75 a 100 años, sin embargo, durante buena parte del tiempo que están en uso, el rendimiento de las tuberías puede tener una degradación significativa debido a la corrosión interna y externa y a la tuberculación, afectando así a la calidad del agua y aumentando los costos de bombeo. Por lo tanto, estas tuberías funcionaron de manera ineficiente mucho tiempo después de concluida su vida útil.
- ▶ El DI, como el PVC, se ha utilizado para la infraestructura de las tuberías de agua y aguas residuales durante unos 60 años. En este estudio, a las tuberías de DI se les asigna una vida útil de 50 años teniendo en cuenta los datos de las fallas de las tuberías de DI y el hecho de que las nuevas tuberías de hierro dúctil tienen paredes mucho más delgadas que las tuberías de hierro más antiguas y carecen de excavaciones independientes y estudios de pruebas de material de las tuberías.
- ▶ Los sistemas de tuberías metálicas requieren una evaluación extensa de su condición, encuestas de corrosión, sistemas de protección contra la corrosión y pruebas de calidad del agua.
- ▶ Dado que existen muy pocos datos sobre la longevidad y el rendimiento real de las tuberías de HDPE más nuevas con paredes más delgadas, se asumió que cuentan con una vida útil de 50 años debido a su potencial para la oxidación, la deformación por fluencia y el factor de seguridad reducido.

1.3 La calidad del agua constante a largo plazo es un requisito de sustentabilidad crítico durante la vida útil de las tuberías

- ▶ Las tuberías de PVC no se corroen por las bacterias y la biopelícula y tampoco sirven como una fuente de nutrientes para el crecimiento bacteriano.
- ▶ Las tuberías de PVC no se degradan, corroen o filtran cuando se exponen a agua corrosiva, aguas residuales, gases de alcantarilla o desinfectantes.
- ▶ Las tuberías de PVC no requieren aditivos químicos para evitar la corrosión interna.
- ▶ Las tuberías de PVC no tienen fallos prematuros inducidos por la oxidación.
- ▶ Las tuberías de PVC no contienen plastificantes tales como DEHP u otros ftalatos.
- ▶ Las tuberías de PVC no contienen plomo.
- ▶ Las tuberías de PVC no contienen BPA.
- ▶ Las tuberías de PVC no extraen cloruro de vinilo del monómero.
- ▶ Las tuberías de fundición han utilizado plomo fundido como junta de tuberías desde finales de 1800. Es muy probable que cualquier sistema de distribución de agua de tubería de hierro de más de 60 años contenga plomo para sellar las juntas de las tuberías. Estas tuberías de hierro se enfrentan a problemas severos de corrosión, alta pérdida de agua y pueden ser una fuente de contaminación por plomo para los suministros de agua potable.
- ▶ Las tuberías metálicas y de hormigón siempre están en riesgo y sometidas a la corrosión interna y externa. Requieren que se coloquen aditivos químicos (fosfatos) en el agua potable para ayudar a reducir la corrosión de la pared de las tuberías. Los fosfatos aumentan las posibilidades de biocrecimiento (tales como la proliferación de algas en casos extremos) en las fuentes de agua potable, lagos y ríos.
- ▶ Las tuberías de hierro corroídas causan oxidación con un aumento de iones de hierro. Esto puede causar que un desinfectante de agua se vuelva ineficaz, produciendo un mayor riesgo de contaminación.
- ▶ El área interior de una tubería de hierro dúctil que va desde el principio de la campana hasta la junta de estanqueidad no está revestida con material de revestimiento, de modo que esa parte de cada conjunto de tubería de DI instalado tiene agua potable expuesta a una superficie no certificada para NSF/ANSI 61.
- ▶ Los estudios demuestran que los revestimientos de mortero de cemento utilizados en las tuberías de hierro dúctil pueden fallar o se degradan en un período de entre 10 y 30 años debido a problemas estructurales y filtración química. Esto deja el agua potable expuesta a una pared de la tubería no certificada para NSF/ANSI 61.

1.4 La fabricación es una importante etapa del ciclo de vida, considera los materiales para tuberías que utilizan un proceso de fabricación eficiente con emisiones mínimas para el medio ambiente

- ▶ La fabricación de tuberías de PVC es un proceso muy eficiente. Se requieren bajas entradas de energía y agua, y los desechos y los materiales de trabajo de reelaboración (triturado) se pueden devolver directamente al proceso de fabricación. Prácticamente no hay ningún residuo de fabricación.
- ▶ Solo se requiere una pequeña cantidad de energía para la extrusión de las tuberías de PVC, por lo que la fabricación es un pequeño contribuyente a los impactos de principio a fin.
- ▶ El uso de la tecnología de conservación del agua de circuito cerrado ha reducido significativamente el consumo de agua para la fabricación de tuberías de PVC, lo que demuestra el compromiso de la industria para la mejora y la eficiencia continua.
- ▶ Muchos procesos de producción de material para tubería emiten dioxinas, como la fabricación de tubería de hierro dúctil, la fundición de tuberías de hierro para fontanería, tuberías de hormigón y resina de PVC. Los datos de la EPA de EE. UU. sobre emisiones de dioxinas de la fabricación de resinas de PVC muestran que los niveles de dioxina son extremadamente bajos para la producción de resina de PVC y se están reduciendo continuamente.
- ▶ Los datos de la EPA de EE. UU. muestran que las emisiones de dioxina liberadas de una fundición de hierro dúctil eran casi seis veces más altas que los de una instalación de producción de resina de PVC.
- ▶ Las instalaciones de fabricación de tubería de PVC no emiten dioxinas.
- ▶ La fabricación de tuberías de hierro dúctil, que utiliza metales reciclados, puede liberar una gran cantidad de productos químicos adicionales, tales como plomo, mercurio, manganeso, zinc, compuestos de cromo, trimetilamina, xileno, metanol y fenol en el proceso.
- ▶ Los gases de efecto invernadero (GHG, por sus siglas en inglés) son mucho más altos para el hormigón que para las tuberías de PVC. Esto ilustra claramente la necesidad de evaluar todos los aspectos del ciclo de vida, cuando se seleccionan los materiales para tubería. La industria del cemento está clasificada como el tercer mayor emisor de gases de efecto invernadero, ya que libera más del 5 % de las emisiones de dióxido de carbono del mundo.
- ▶ La producción de tuberías de PVC usando material virgen tiene un menor consumo energético que la producción de tubería de hierro dúctil con materiales reciclados, lo que resulta en un menor número de impactos ambientales para proyectos de infraestructura hídrica.

1.5 El transporte y la instalación del material de las tuberías tiene un impacto significativo en el costo del ciclo de vida y el impacto ecológico

- ▶ Las tuberías de PVC tienen un impacto ecológico de transporte inferior por pie instalado en comparación con las tuberías dúctiles, de hormigón y de arcilla.
- ▶ Las tuberías de PVC pesan un 25 % del total de las de hierro dúctil por pie, lo que significa que las tuberías de PVC se pueden transportar con un impacto ecológico menor en comparación con longitudes equivalentes de tubería de hierro dúctil.
- ▶ Las plantas productoras de tuberías de PVC se encuentran alrededor de los Estados Unidos y Canadá, lo que reduce los costos de transporte y el impacto ambiental.
- ▶ El peso ligero y la durabilidad de las tuberías de PVC pueden reducir los costos de instalación y el impacto ambiental, así como las emisiones de gases de efecto invernadero. Se pueden utilizar equipos de trabajo más ligeros y cuadrillas más pequeñas para la instalación de tuberías de PVC en comparación con otros materiales para tubería.
- ▶ Las tuberías de PVC eliminan los costos de tránsito, las construcciones relacionadas y los impactos ambientales, así como otras pérdidas de ingresos asociados con reemplazos de tuberías durante una vida útil prevista de 100 años.
- ▶ Las tuberías de PVC se pueden instalar con un ahorro de tiempo de instalación del 30 % más que las tuberías de hormigón.
- ▶ Las tuberías de hierro dúctil de 8 pulgadas producen nueve veces más emisiones de carbono durante la fabricación, el transporte y la instalación que las tuberías de PVC equivalentes.
- ▶ Los materiales para tuberías, como el hierro dúctil, el polipropileno, el polietileno, la arcilla y el concreto requieren costos adicionales y han aumentado el impacto ambiental debido a la necesidad de sustituirlas al menos una vez durante una vida prevista de 100 años.

1.6 El consumo de energía para el bombeo provoca un costo y un impacto significativos durante la vida del sistema de tuberías

- ▶ Un costo significativo durante la vida prevista de un sistema de tubería de presión es la energía necesaria para bombear el agua. El uso de materiales para tuberías que no se corroen reduce el bombeo de energía y el impacto ecológico del sistema de tuberías durante su vida útil. Este estudio proporciona a los ingenieros de servicios públicos los costos de energía de bombeo para diferentes materiales de tubería durante un período de 100 años.
- ▶ Los sistemas de tratamiento y de entrega de aguas municipales requieren una cantidad significativa de energía para mover el agua. Las empresas de agua y aguas residuales suelen representar hasta un 40 % del consumo total de energía de un municipio.
- ▶ La energía necesaria para bombear el agua a través de un sistema de tuberías a presión durante la vida útil de las tuberías es una fuente significativa de impactos ambientales potenciales.
- ▶ Más empresas de servicios públicos y los gobiernos locales están implementando estrategias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero como parte de sus objetivos a largo plazo.
- ▶ Las tuberías de hierro y de hormigón no muestran un funcionamiento óptimo durante gran parte del tiempo que están “en uso”, ya que a menudo están plagadas de las principales roturas de las tuberías de abastecimiento de agua, pérdida de agua, problemas de calidad del agua, así como de altos costos de funcionamiento y mantenimiento debido a la corrosión.
- ▶ Los suelos corrosivos afectan al 75 % de los servicios de agua. La durabilidad y resistencia a la corrosión de una tubería afecta en gran medida al impacto ambiental del ciclo de vida. Las tuberías de hierro dúctil pueden durar tan solo entre 11 y 14 años en suelos moderadamente corrosivos, lo que requiere numerosas sustituciones durante un período de 100 años. Esto aumenta los impactos de energía ambiental incorporada de las tuberías de hierro por hasta nueve veces en comparación con las de PVC.
- ▶ La reducción de la corrosión interior y exterior de las tuberías de hierro dúctil requiere la adición de otros materiales tales como un revestimiento de cemento en el interior y una funda de polietileno en el exterior. Los sistemas de protección catódica también se utilizan en los sistemas de agua para ayudar a prevenir la corrosión en las tuberías de hierro fundido y hierro dúctil. El uso excesivo o incorrecto de protección catódica puede corroer las tuberías de hierro dúctil. La adición de otros materiales para prevenir la corrosión aumenta el consumo de recursos, la energía incorporada y el impacto ecológico del producto. Las tuberías de PVC no requieren materiales adicionales para evitar la corrosión.

- La corrosión reduce el coeficiente de flujo de Hazen-Williams y aumenta el coeficiente de rugosidad (n) de Manning debido a la rugosidad de la superficie interna de las tuberías.
- La corrosión afecta significativamente la eficiencia de bombeo. Mantener las tuberías en uso más allá de su vida útil de servicio da como resultado mayores costos de operación y mantenimiento. La degradación de la pared interna de las tuberías puede comenzar casi inmediatamente después de la instalación de las tuberías de fundición dúctil y de hormigón.
- La energía necesaria para bombear agua a través de una tubería de PVC en una vida prevista de 100 años se mantiene constante debido a que las paredes de las tuberías de PVC son suaves y no se ponen rugosas con el tiempo. Esto genera ahorros de costos globales durante el ciclo de vida y un impacto ecológico menor en comparación con las tuberías de hierro dúctil y de hormigón que requieren más energía de bombeo con el tiempo debido a la corrosión, las fugas y la degradación interna.
- Para tuberías equivalentes de 8 pulgadas, la demanda de energía primaria de bombeo es de hasta el 100 % mayor para la HDPE que para el PVC, y para DI es de hasta el 54 % mayor que el PVC.
- El costo de capital para una nueva tubería de PVC puede ser casi un 23 % más económico que la limpieza y re-alineación de las tuberías de hierro dúctil existente.
- Las tuberías de PVC tienen impactos bajos de energía incorporada, así como paredes consistentemente lisas que no se corroen, que ayudan a los servicios públicos y los gobiernos locales a minimizar la energía (y por tanto los gases de efecto invernadero) requerida para operar los sistemas de agua.
- Las tuberías de presión de hierro dúctil y de cilindro de hormigón pretensado pueden experimentar una disminución del 30 % o más en el factor de fricción durante su vida útil. Esto significa que las tuberías de DI y PCCP más antiguas pueden requerir un 100 % más de energía de bombeo que una tubería nueva.
- El 66 % de las tuberías de suministro de agua en los EE. UU. son de 8 pulgadas o más pequeñas. A nivel nacional, el uso de PVC en lugar de tubería de hierro dúctil podría ahorrar \$21 mil millones en costos de bombeo durante una vida prevista del sistema de 100 años. Si se utilizara PVC en lugar de las tuberías de HDPE, se podrían ahorrar \$37 mil millones (dólares en 2016).
- Las estaciones de bombeo para las tuberías que no son de PVC deben ser diseñadas para tener capacidades de mayor tamaño con líneas de suministro de energía eléctrica más grandes debido al incremento de la fricción interna de las tuberías con el correr del tiempo. Estas instalaciones de bombeo de mayor capacidad requieren mayor energía incorporada para construirlas, operarlas y mantenerlas durante su vida prevista.
- En el caso de las tuberías de alcantarillado de pared sólida de 24 pulgadas equivalentes en la misma pendiente, el PVC tiene un 24 % más de capacidad que las tuberías de DI, un 50 % más de capacidad que las tuberías de arcilla y un 35 % más de capacidad que las tuberías de concreto no reforzado (NRCP).

1.7 La eficiencia del bombeo de agua y la capacidad de alcantarillado son los generadores de costos significativos para los municipios con el correr del tiempo

- Las tuberías de polietileno (HDPE) tienen un diámetro interno mucho más pequeño que las de hierro dúctil y las de PVC, impactando significativamente su eficiencia de bombeo con el tiempo.
- Los materiales tales como el hierro dúctil (DI) y las tuberías de cilindro de hormigón pretensado (PCCP) pueden tener un diámetro interno inicial más grande y un factor de fricción respetable cuando son nuevas, pero las instalaciones de bombeo no están diseñadas teniendo en cuenta la capacidad de las nuevas tuberías. El deterioro del mortero de revestimiento y la corrosión de las tuberías de DI requieren mayor energía de bombeo durante la vida prevista de 100 años que para el PVC.

1.8 La gestión de finalización de la vida útil es una consideración importante del ciclo de vida

- Las tuberías de PVC pueden ser recicladas de nuevo en sí mismas hasta ocho veces sin que se produzca una reducción en las propiedades mecánicas.
- Las tuberías de PVC pueden ser recicladas a muchos productos. El PVC es un material inerte y no se degrada fácilmente, así que cuando las tuberías de PVC llegan al final de su vida de servicio tendrán un mínimo impacto ambiental si se dejan en el suelo.
- El contenido reciclado es solo un atributo y está lejos de una visión completa de los impactos ambientales del ciclo de vida. Las tuberías de desagüe de hierro se eliminaron como una alternativa ecológica en GreenSpec® debido a las “altas emisiones de energía y de contaminación que incorporan las plantas de coque” usadas para producir el producto.
- La mayor fuente de metal reciclado para tubería de hierro dúctil son los automóviles de descarte. Este tipo de desecho es el más difícil de usar debido a que la composición química es variable y puede incluir mercurio (un contaminante del aire volátil) y otras toxinas.
- Las tuberías de PVC son reciclables. Sin embargo, ya que es tan duradera, la mayor parte de esta todavía tiene que entrar en el flujo de reciclaje.

1.9 Los LCA de las tuberías de PVC en todo el mundo proporcionan hallazgos similares

- ▶ Este estudio examinó varios estudios de LCA a disposición del público realizados en todo el mundo, y los resultados de esos estudios fueron consistentes con los resultados del LCA para tuberías de PVC.
- ▶ Las tuberías de PVC tienen numerosos atributos de sustentabilidad. Los estudios internacionales han identificado los beneficios relativos al comportamiento medioambiental y la sustentabilidad de las tuberías de PVC en comparación con otros materiales.
- ▶ Un LCA independiente sobre los sistemas de tuberías de aguas residuales establece que el hierro dúctil tiene el máximo impacto ambiental mientras que el PVC tiene el mínimo impacto ambiental.
- ▶ Los estudios confirman que las tuberías de PVC son una opción de bajo costo inicial y proporcionan ahorros a largo plazo debido a su eficiencia de bombeo superior, resistencia a la corrosión y longevidad.



INFRAESTRUCTURA HÍDRICA SUSTENTABLE

2.1 Antecedentes

En 2010, la Agencia de Protección Ambiental (EPA de EE. UU.) publicó la Política de sustentabilidad de la infraestructura hídrica para el agua limpia y potable segura, que describe una visión general y la prioridad para garantizar la sustentabilidad a largo plazo de la infraestructura hídrica.¹ La política alienta a los servicios públicos a mejorar sus procesos de planificación actuales para asegurar que las inversiones de infraestructura hídrica sean rentables durante la vida prevista, utilicen de manera eficiente los recursos, y respalden los objetivos comunitarios. Esta política incluye el análisis de una serie de alternativas y otros enfoques innovadores, basados en el análisis del ciclo de vida completo, mientras se enfrenta al reto de reparación y sustitución de la infraestructura hídrica vieja.

En 2015, la EPA publicó el plan de trabajo para el Programa Nacional del Agua sobre el Cambio Climático. El plan declara “ante el cambio climático, los servicios públicos de agua potable, aguas residuales y aguas pluviales flexibles y adaptables deben garantizar agua limpia y segura para proteger la salud y el medio ambiente públicos de la nación, tomando decisiones inteligentes de inversión para mejorar la sustentabilidad de su infraestructura y operaciones, y las comunidades a las que sirven, al tiempo que reducen las emisiones de gases de efecto invernadero a través de una mayor eficiencia energética”.²

Este análisis del ciclo de vida de las tuberías de PVC para agua y alcantarillado y el análisis comparativo de la sustentabilidad de los materiales para tuberías se centra en la revisión exhaustiva de los impactos ambientales, los beneficios y la sustentabilidad de las tuberías de PVC para la infraestructura hídrica y de alcantarillado. El análisis del ciclo de vida (LCA) fue elegido como la herramienta para analizar, cuantificar e informar de forma transparente los potenciales impactos ambientales asociados con las tuberías de PVC a lo largo de cada etapa del ciclo de vida. El LCA fue revisado por expertos y es la base desde la que se desarrolló y publicó la Declaración Ambiental de Producto (EPD) para la industria de las tuberías de PVC, por medio de la NSF Internacional. La EPD, según lo validado por NSF Internacional, afirma: “las tuberías y los accesorios de PVC son resistentes a los productos químicos que se encuentran generalmente en los sistemas de agua y alcantarillado, evitando cualquier lixiviación o emisión al agua subterránea y de superficie... No se liberan productos químicos conocidos internamente en el sistema de agua. No se producen efectos de toxicidad conocidos en el uso del producto”.³

Además de los hallazgos del LCA, este estudio analiza exhaustivamente los impactos medioambientales de las tuberías de PVC basados en prácticas ambientales actuales en la industria de las tuberías y a través de análisis comparativo. Los resultados demuestran que las tuberías de PVC tienen atributos ambientales y económicos significativos para los sistemas de agua y alcantarillado de larga duración.

2.2 Tubería de PVC en América del Norte

El PVC fue descubierto en la década de 1830, pero no se introdujo como tubería en América del Norte hasta 1951. El Dr. P. Heilmayr, Ph.D., considerado por muchos como uno de los padres fundadores de la extrusión moderna de PVC, junto con los historiadores de PVC, los Doctores J. Summers y A. Whitney, afirman que las tuberías de PVC producidas en 1952 para la Marina de EE. UU. utilizaron estabilizadores de estaño, que se convirtieron en el estándar de la industria a partir de entonces, tanto para las tuberías como para las conexiones. El plomo como estabilizador fue rechazado en un principio por la industria norteamericana de tuberías y accesorios de PVC. En 1955 la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM) comenzó a desarrollar estándares de tuberías de plástico. La Fundación Nacional de Saneamiento (ahora conocida como NSF International) comenzó la certificación de tuberías de PVC estabilizadas con estaño para el agua potable en 1956.

El LCA, así como la evaluación general, fue encargado por Uni-Bell PVC Pipe Association. Esta asociación representa la industria del mercado de tuberías de PVC rígido de 4 a 60 pulgadas en América del Norte. Las tuberías para agua y aguas residuales de PVC rígido, fabricado en los EE. UU. y Canadá, no utiliza ni contienen ftalatos, plomo o cadmio. Como resultado, las tuberías de PVC son reconocidas como un producto para tubería segura y beneficioso para la salud pública.

Mientras este análisis del ciclo de vida de las tuberías de agua y alcantarillado de PVC y el análisis comparativo de la sustentabilidad de los materiales para tuberías se centran en los sistemas de tuberías de PVC, este estudio global incluye información del ciclo de vida a disposición del público y un examen comparativo de las alternativas correspondientes de los productos para tuberías. La comparabilidad puede ser un desafío debido a la falta de comprensión de los materiales y procesos y las complejidades involucradas en la medición de los impactos ambientales del consumo de energía de tuberías con diferentes vidas útiles. La comparación de los datos del LCA también es difícil debido a la incertidumbre inherente y las diferencias en los parámetros y los datos.

2.2.1 La norma 61 de la certificación NSF/ANSI verifica que no haya lixiviación de cloruro de vinilo de las tuberías de PVC

La EPA no ha encontrado ningún caso de lixiviación de cloruro de vinilo de las tuberías de PVC con juntas fabricadas en América del Norte para la transmisión y distribución de agua en tamaños de 4 a 60 pulgadas. Según un estudio de la EPA de 2002 sobre la permeación y la lixiviación, algunas tuberías de PVC sin juntas (cementadas con disolvente) de menos de 2 pulgadas de diámetro fabricadas en los EE. UU. antes de 1977 experimentaron lixiviación de cloruro de vinilo. Sin embargo, nunca se ha citado ningún caso de lixiviación de cloruro de vinilo de ninguna tubería de PVC fabricada en América del Norte luego de 1977.⁴

Es importante entender el significado de una lixiviación de cloruro de vinilo y cómo se regula. Los estados de Estados Unidos exigen que los productos de abastecimiento público de agua en contacto con el agua potable tengan certificación NSF/ANSI 61 sobre los efectos en la salud de los componentes del sistema de agua potable. La norma fue desarrollada para medir y limitar los niveles de contaminantes químicos e impurezas que se imparten indirectamente al agua potable a partir de productos, componentes y materiales utilizados en los sistemas de agua potable. Esta norma establece un límite para la cantidad de cloruro de vinilo residual contenido en las tuberías y conexiones de PVC y asegura que se cumplan todos los requisitos de salud y seguridad del agua potable. Sin embargo, el seguimiento de cloruro de vinilo en sistemas de agua puede ser un reto ya que los estudios han demostrado que el cloruro de vinilo puede ser un subproducto de la desinfección de los sistemas del tratamiento de clorado.⁵

La NSF/ANSI 61 requiere que la medición del monómero residual de cloruro de vinilo (RVCM) en las tuberías de PVC que se venden y se instalan en los EE. UU. estén consistentemente por debajo de 0,2 partes por mil millones, que es una décima parte del nivel permisible por la EPA para el agua potable. Las tuberías modernas de PVC se evalúan sistemáticamente con la prueba “No-Detectado” para el monómero de cloruro de vinilo.⁶ NSF International dirigió el desarrollo de las normas nacionales de Estados Unidos para todos los materiales y productos que tratan o entran en contacto con agua potable. En 1990, la EPA sustituyó su propio programa de asesoramiento de productos para agua potable con las normas de NSF International.

2.2.2 Duración de las tuberías de PVC

La aplicación de las características incorrectas de las tuberías, combinada con la falta de conocimientos del diseño de las tuberías de PVC, ha subestimado la duración de la vida de servicio de las tuberías de PVC. El informe de la American Water Works Association titulado *Buried No Longer* (Sin más entierros) publicó erróneamente una vida útil de las tuberías de PVC basada en percepciones de 1960-1970.⁷ Esas percepciones fueron refutadas a través de una extensa investigación, estudios y pruebas de la vida útil y del rendimiento de las tuberías de PVC.^{8 9 10 11 12} Se ha descubierto que la esperanza de vida real de las tuberías de PVC para agua y alcantarillado es de más de 100 años. El rendimiento inadecuado y la esperanza de vida de las tuberías pueden exagerar la gestión de activos del agua para los costos de reemplazo de las tuberías.¹³ Para las empresas de gestión del agua con programas de gestión de activos, una suposición de vida útil de las tuberías inexacta distorsionará las estrategias de mantenimiento, los planes de gestión de activos y las proyecciones de costos, lo que resulta en proyecciones exageradas de los fondos para el reemplazo de infraestructura. Esto conduce a aumentos de las tasas y una desalineación de la financiación de bonos a largo plazo.

2.3 Redefinición de la sustentabilidad y la calidad del agua

Esta revisión exhaustiva de la sustentabilidad establece un nuevo estándar de referencia con claridad y transparencia para el agua de los Estados Unidos y Canadá, los fabricantes de tuberías de aguas residuales y aguas pluviales, los ingenieros de servicios públicos y los funcionarios elegidos. También redefine la planificación de la sustentabilidad para la infraestructura de tuberías subterráneas.

La sustentabilidad es la capacidad de mantener un cierto nivel de rendimiento, un recurso o una operación a largo plazo. La sustentabilidad incluye la evaluación y el enfoque en el desempeño económico, ambiental y social para una organización o un producto. Al tener en cuenta las características sociales y ambientales de un producto, además de sus aspectos financieros y económicos, se puede lograr un equilibrio. Las preocupaciones sobre sustentabilidad están aumentando a medida que más del 50 % de la infraestructura hídrica y de aguas residuales municipales de los Estados Unidos se acerca al final de su vida útil. Según un estudio del congreso de 2002, los costos de la corrosión del sistema hídrico y de aguas residuales de EE. UU. es superior a \$50,7 mil millones al año. Desde enero de 2000, el impacto financiero de la corrosión en la infraestructura hídrica y de alcantarillado de Estados Unidos es mayor a \$700 mil millones y está en ascenso.¹⁴ Con más de 300.000 roturas de las tuberías de abastecimiento de agua por año durante los próximos diez años, los servicios públicos municipales han sentado las bases para más de \$532 mil millones en mejoras de capital para abordar el deterioro de las redes de tuberías, el desborde de las alcantarillas y las crecientes demandas de la población para los nuevos suministros de agua.¹⁵

2.3.1 Características de las tuberías sustentables

Un producto para tuberías sustentable debe tener las siguientes características:

- ▶ Bajos costos iniciales y de funcionamiento
- ▶ Longevidad, con una vida útil de al menos 100 años
- ▶ Baja energía de bombeo durante la vida útil
- ▶ Resistencia a la corrosión (no debe requerir materiales o gastos adicionales)
- ▶ Bajo mantenimiento
- ▶ Baja energía incorporada
- ▶ Desperdicios mínimos durante la fabricación
- ▶ Prácticas de fabricación sustentables
- ▶ Costos de instalación mínimos
- ▶ Impactos mínimos de transporte
- ▶ Reciclabilidad al final de la vida
- ▶ Agua de alta calidad constante, sin aditivos químicos
- ▶ Sin infiltración o exfiltración

Las tuberías de PVC cumplen con las características de las tuberías sustentables enumeradas anteriormente, y el rendimiento y la durabilidad están, además, garantizadas por las características enumeradas a continuación. La industria de las tuberías de PVC también ha dado a conocer de manera transparente sus impactos ambientales en este informe y a través de la Declaración Ambiental de Producto certificada por NSF International.

La sustentabilidad del PVC también se atribuye a:

- ▶ La corrosión y la resistencia química, sin la necesidad de revestimientos protectores, revestimientos internos o accesorios adicionales
- ▶ Su liviano peso (en comparación con otros materiales) y facilidad para transportar
- ▶ Índice alto de resistencia al peso
- ▶ Módulo de elasticidad bajo que reduce la magnitud de los aumentos repentinos de presión
- ▶ Resistencia a la tracción a largo plazo con respecto a otras tuberías termoplásticas
- ▶ Las juntas de estanqueidad eliminan fugas o infiltración
- ▶ Excelente resistencia a la abrasión interna y externa
- ▶ Alta resistencia al impacto, incluso a bajas temperaturas
- ▶ Resistencia al fuego
- ▶ Coeficientes de flujo superiores, que contribuyen a bajos costos de funcionamiento y mantenimiento durante su vida prevista¹⁶

Las preocupaciones sobre sustentabilidad están aumentando a medida que más del 50 % de la infraestructura hídrica y de aguas residuales municipales de los Estados Unidos se acerca al final de su vida útil.



3.0

INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (LCA)

El análisis del ciclo de vida es una herramienta que se utiliza para identificar los impactos ambientales de un producto, proceso o actividad a lo largo de toda su vida útil. Los estudios de LCA también cuantifican e interpretan los flujos ambientales desde y hacia el medio ambiente (incluidas las emisiones en aire, agua y suelo, así como el consumo de energía y otros recursos materiales) sobre todo el ciclo de vida de un producto (o proceso o servicio).¹⁷

Las etapas típicas del ciclo de vida de principio a fin, como se muestra en la Figura 3.1, incluyen:

- 01** : Extracción y procesamiento de las materias primas
- 02** : Fabricación
- 03** : Transporte y distribución
- 04** : Instalación, uso y mantenimiento
- 05** : Reciclaje y eliminación final

Con la inclusión de los impactos en todo el ciclo de vida del producto, el LCA ofrece una visión completa de los aspectos ambientales del producto y una imagen precisa de las verdaderas ventajas y desventajas ambientales en la selección de productos.

El estudio del LCA examinó siete productos para tuberías de PVC desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. La etapa de uso se analizó por separado. Los productos de tubería se describen en la Tabla 3.1.

FIGURA 3.1 : CICLO DE VIDA DE LAS TUBERÍAS DE PVC

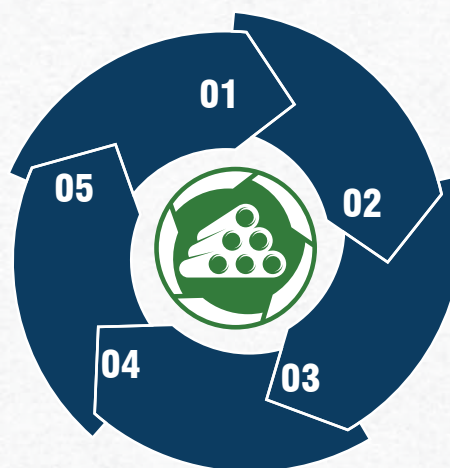


TABLA 3.1 : PRODUCTOS PARA TUBERÍAS DE PVC BAJO EL ALCANCE DEL LCA

Aplicación	Estándar	Díámetro nominal	Coefficiente de dimensión/Rigidez de las tuberías	Peso promedio* (libras/pies)
Agua potable	AWWA C900	8"	DR18	9.1
	AWWA C900	8"	DR25	6.7
	AWWA C905**	24"	DR25	55.9
Aguas pluviales	ASTM F794 AASHTO M304	24" pared de perfil	PS46	19.2
Drenaje sanitario	ASTM F794	8" pared de perfil	PS46	2.5
	ASTM D3034	8" pared sólida	PS46	4.3
	ASTM F679	24" pared sólida	PS46	38.7

*Los pesos se basan en las publicaciones de los fabricantes y los estándares de las tuberías.

** A partir de agosto de 2016 las disposiciones de la norma AWWA C905 han sido reemplazadas y se incluyen en la norma AWWA C900.

Existen varios métodos a nivel mundial para clasificar y caracterizar el impacto del ciclo de vida de los flujos desde y hacia el medio ambiente que pueden complicar de alguna manera la comparabilidad de los diferentes estudios de LCA. Otras variables en el LCA incluyen los límites del sistema (la distancia de corriente ascendente, descendente y lateral a la que se hace el análisis), la unidad funcional (cuál es el volumen/masa/finalidad del objeto que se está evaluando), y los métodos de LCA específicos tales como la asignación (cómo son asignados los impactos al producto, los subproductos, y sobre qué base). Cuando se comparan dos estudios de LCA, estos factores son críticos a fin de interpretar el análisis.

La EPD y el LCA de las tuberías de PVC para la industria de tuberías de PVC de América del Norte ofrecen una completa transparencia sobre los impactos y los beneficios del ciclo de vida de las tuberías de PVC. La fabricación e instalación de las tuberías de PVC se completan según las normas y certificaciones de ASTM International (anteriormente Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales), AWWA (Asociación Estadounidense del Agua), AASHTO (Asociación Estadounidense de Oficiales Estatales de Carreteras y Transporte), CSA (Asociación de Normas Canadienses) y NSF International. Esto asegura que los productos para tubería de PVC cumplen con los más altos estándares de calidad y seguridad.

Los resultados del LCA se presentan en este estudio. Además, estos resultados se pueden encontrar en la EPD de la industria de tuberías de PVC publicado a través de NSF International. Un EPD se considera una declaración ambiental tipo III, que proporciona datos de LCA de una manera estandarizada, lo que permite al lector comparar el rendimiento medioambiental de los productos sobre la base de un ciclo de vida. Un EPD se basa en una Regla de categoría de producto (PCR, por sus siglas en inglés), que es un conjunto de normas específicas, requisitos y directrices para las declaraciones de Tipo III. Antes de publicar un EPD, la PCR y el LCA se someten a una revisión por parte de un tercero. La EPD también se verifica de forma independiente y se publica a través de un operador del programa.

3.1 Objetivos del análisis del ciclo de vida

Los objetivos del análisis del ciclo de vida de la tubería de PVC fueron los siguientes:

- ▶ Cuantificar los resultados de impacto ambiental utilizando la metodología de análisis del ciclo de vida siguiendo las normas establecidas por la serie 14040 de la Organización Internacional de Normalización (ISO)
- ▶ Investigar cada etapa del ciclo de vida de una tubería de PVC para obtener los impactos asociados
- ▶ Revisar el uso de la tecnología moderna en la producción de tuberías de PVC
- ▶ Investigar las características de la etapa de uso y el rendimiento de las tuberías
- ▶ Investigar las metodologías de instalación

3.2 Aspectos clave de la metodología de las Normas ISO para el LCA de las tuberías de PVC

El estudio del LCA de las tuberías de PVC de América del Norte se llevó a cabo de acuerdo con el inventario del ciclo de vida (LCI, por sus siglas en inglés) y las normas de evaluación del impacto del ciclo de vida (LCIA, por sus siglas en inglés), como se indica en la Sección 3.1 establecida por las normas ISO de la serie 14040 para la evaluación del ciclo de vida útil de la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés). Los aspectos clave del estudio incluyen:

- ▶ Los resultados del estudio de LCA se han publicado en una declaración ambiental del producto que cumple con las normas ISO 14025 y fue verificada independientemente por NSF International de acuerdo con los requisitos establecidos por el apéndice de la Norma de categoría de producto para los sistemas de tuberías para uso con aguas residuales y aguas pluviales (Bajo gravedad) en América del Norte, que incluye los sistemas de tuberías de agua potable según la versión 2 del anexo.¹⁸
- ▶ El estudio fue revisado por un panel de expertos independientes de la industria y de LCA para corroborar la conformidad con las normas internacionales de LCA.
- ▶ El LCA de las tuberías de PVC ofrece la transparencia ambiental integral de principio a fin, lo que resulta en el primer estudio de todo el sector en la industria de las tuberías de América del Norte para proporcionar un EPD conforme a la ISO 14025.
- ▶ La EPD publicada complementa las pruebas y certificaciones de las tuberías de PVC existentes de NSF International, que justifique que no hay efectos adversos o tóxicos en la salud provenientes del agua potable de las tuberías de PVC.¹⁹

3.3 Panel de revisión de expertos independientes

El análisis del LCA para tubería de PVC estuvo sujeto a la revisión crítica de un panel internacional de expertos en evaluación de ciclos de vida. La EPD publicada utiliza los resultados de este LCA revisado críticamente. El panel de revisión está formado por:

Dra. Rita Schenck, Ph.D., Profesionales certificados en evaluación del ciclo de vida (LCACP, por sus siglas en inglés) (Presidente): Director ejecutivo del Instituto para la Investigación y Educación Ambiental (IERE, por sus siglas en inglés)

La Dra. Rita Schenck, experta a nivel mundial y Directora Ejecutiva del Instituto, aporta su conocimiento del LCA y el proceso de revisión crítica de este proyecto. Como miembro de la comisión que formó la serie original de ISO 14000 en la década de 1990, está plenamente versada en cómo estas normas rigen el LCA y la EPD. Rita Schenck fundó el Instituto de Investigación y Educación Ambiental (IERE, por sus siglas en inglés) después de trabajar durante muchos años como gerente ambiental. Rita representó a los EE. UU. en la negociación de las normas ISO en el LCA. Continúa trabajando como experta internacional en LCA, sirviendo en el comité científico de la conferencia de LCA de alimentos, CILCA (conferencia latinoamericana de LCA), y como ponente, revisor y testigo experto.

Nigel Howard, C.Chem.: Director general de Clarity Environment

El Sr. Nigel Howard tiene una reputación internacional por su trabajo, sobre todo en el LCA y la calificación ambiental de los edificios. En su carrera temprana en el Reino Unido trabajó para la Rama Científica del Ayuntamiento de Londres realizando evaluaciones de productos (plásticos incluidos) e investigando fallas de productos (lo que incluyó tuberías). También completó el Proyecto de Perfiles Ambientales del Reino Unido (metodología acordada por consenso para los 24 sectores de productos de construcción del Reino Unido) y fue pionero en la *Guía Verde de Especificación* basada en el LCA. Presidió el Grupo de Consulta Pública sobre PVC del Departamento Gubernamental de Medio Ambiente, Transporte y Región del Reino Unido. Pasó 5 años en los EE. UU. como vicepresidente y director de tecnología del Consejo de Construcciones Ecológica de los EE. UU. (USGBC, por sus siglas en inglés) donde contribuyó en el proyecto de la base de datos del inventario del ciclo de vida de los EE. UU. y gestionó el Comité Científico Asesor Técnico del USGBC donde investigó las implicaciones del LCA y el riesgo para la salud de los productos de PVC y las alternativas.

Charlie He, P.E.: Vicepresidente adjunto de Carollo Engineers

El Sr. Charlie (Qun) He, vicepresidente adjunto e ingeniero principal en Carollo, cuenta con más de 12 años de experiencia en tratamiento de agua y aguas residuales, análisis de datos de la calidad del agua, modelado por computadora, trabajo analítico avanzado, química ambiental, recursos hídricos, hidrología, distribución del agua y recolección y tratamiento de aguas residuales. El Sr. He es un Profesional Acreditado en Liderazgo en Diseño Energético y Ambiental (LEED AP, por sus siglas en inglés) y ha ganado amplia exposición en el campo de la sustentabilidad. Es un experto en el diseño de edificios ecológicos y sus impactos en la calidad del agua. Ha llevado a cabo la evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida, la contabilidad de las emisiones de carbono, participó en estudios de optimización y análisis de la eficiencia energética del sistema hídrico y de aguas residuales.

3.4 Descripción de la estimación del costo del ciclo de vida

El LCA no se debe confundir con el análisis del cálculo del costo del ciclo de vida (LCC). El LCC evalúa los costos monetarios involucrados con un producto o servicio, mientras que el LCA se centra en los posibles impactos ambientales de un producto, sistema o servicio.²⁰ El costo total del ciclo de vida de un proyecto no se limita a la inversión de capital inicial del proyecto. Se consideran costos adicionales durante la vida del proyecto, incluidos los costos de operación, mantenimiento, reposición y fin de la vida útil. Se considera cada aspecto para cada diseño propuesto para un proyecto. La EPA de los EE. UU. y la Conferencia de Alcaldes de EE. UU. y la Asociación Estadounidense de Trabajadores del Agua recomiendan el cálculo del costo del ciclo de vida para la verificación y selección de proyectos y como parte de una estrategia de planificación de reparación y sustitución. La Fundación de Investigación Ambiental del Agua (WERF, por sus siglas en inglés) desarrolló una herramienta para las empresas de gestión del agua con el fin de ayudar con un análisis del cálculo del costo del ciclo de vida.²¹ Estudios europeos han encontrado que las tuberías de PVC tienen el mejor costo total de propiedad para las redes de agua potable. Las tuberías de HDPE son en promedio 9-12 % más caras, mientras que el hierro dúctil es 19-26 % más caro durante un período de 50 años en comparación con las tuberías de PVC.²² La combinación del costo del ciclo de vida y la evaluación del análisis del ciclo de vida del medio ambiente proporciona un fuerte y convincente proceso de toma de decisiones económico-ambientales.

3.5 Unidades funcionales de 100 pies recomendadas por la industria

La función de las tuberías de PVC estudiadas es llevar agua potable, agua pluvial o aguas residuales a lo largo de una distancia especificada. Este estudio utiliza una longitud del sistema de tuberías de 100 pies, en diámetros especificados y comunes, para revelar los impactos ambientales resultantes. Se requieren juntas y lubricante para las juntas de la tubería de extremo acampanado instalada, y por lo tanto se incluyen en este análisis. La distancia de 100 pies se determinó teniendo en cuenta el apéndice de las Reglas de categoría de productos publicado por UL Environment para las declaraciones de productos medioambientales.²³ La unidad funcional es particularmente importante, ya que los diferentes materiales tienen diferentes densidades y grosores de pared para realizar una función equivalente de transporte de fluidos. Por lo tanto, la longitud de 100 pies del sistema de tuberías se considera la unidad más apropiada para la función.

Este estudio utilizó datos de 23 instalaciones de los miembros de Uni-Bell PVC Pipe Association (consulte la Tabla 3.2 para ver las empresas participantes), lo que representa aproximadamente el 22 % de todas las plantas productoras de tuberías de PVC en los Estados Unidos y Canadá (vea la Figura 3.2). La Tabla 3.3 muestra el número de instalaciones de fabricación que presentaron datos primarios para cada uno de los siete tipos de tuberías analizados.

FIGURA 3.2 : MAPA DE LAS INSTALACIONES DE TUBERÍAS DE PVC QUE PARTICIPARON EN EL LCA



TABLA 3.2 : FABRICANTES DE TUBERÍAS DE PVC QUE PARTICIPAN

Fabricantes de tuberías de PVC que participan	Número de instalaciones que participan
Diamond Plastics Corp.	7
IPEX, Inc.	3
National Pipe & Plastics Corp.	1
North American Pipe Corp.	8
North American Specialty Products	1
PipeLife Jet Stream, Inc.	1
Royal Building Products	2

TABLA 3.3 : INSTALACIONES DE FABRICACIÓN DE TUBERÍAS DE PVC QUE HAN PRESENTADO DATOS PRIMARIOS

Estándar/Tamaño/Producto	Número de instalaciones
AWWA C900/8"/DR18	21
AWWA C900/8"/DR25	3
AWWA C905/24"/DR25	11
ASTM F794/AASHTO M304/24"/PS46	3
ASTM F794/8"/PS46	2
ASTM D3034/8"/PS46	17
ASTM F679/24"/PS46	11

4.0

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA

La siguiente información describe e ilustra los impactos ambientales potenciales del ciclo de vida de las tuberías de PVC que se debe utilizar en la evaluación de todos los productos y sistemas de tuberías. Los resultados del LCA que se presentan en esta sección se centran en dos productos: Tubería de PVC de 8 pulgadas para presión DR25 PC165 AWWA C900 y tubería de alcantarillado con pared sólida de PVC de 8 pulgadas PS46 SDR35 ASTM D3034, se presentan en unidades de 100 pies para una vida prevista de 100 años.

Debido al costo, la práctica común para la mayoría de los servicios públicos es dejar las tuberías en el suelo al final de su vida útil en lugar de desenterrarlas para recuperar los materiales. Las tuberías de PVC, debido a la vida a largo plazo del material, no han entrado en el flujo de residuos reciclados. Como resultado, el impacto de la finalización de la vida útil se considera insignificante. Además, la tubería de PVC permanecerá como un material inerte.

Los impactos de la fase de uso para las tuberías de agua a presión, que es la energía consumida de la fricción de las paredes de las tuberías a medida que el agua está siendo bombeada a través de ellas, se consideran por separado. Por lo tanto, los resultados presentados en esta sección incluyen: extracción y procesamiento de materias primas, el transporte de la materia prima hacia el fabricante de las tuberías, la fabricación, el embalaje, la distribución y la instalación de las tuberías.

4.1 Definiciones y resultados de la evaluación del impacto ambiental TRACI

La demanda de energía acumulada, las emisiones de gas de efecto invernadero (GHG) y los resultados del impacto ambiental adicional fueron incluidos en el estudio. Se utilizó la metodología de impacto ambiental de la EPA de EE. UU. y las herramientas para la reducción y evaluación de impactos químicos y otros impactos ambientales (TRACI, por sus siglas en inglés). Las categorías de impacto de las TRACI incluidas son el agotamiento del ozono, la contaminación, la acidificación, la eutrofización, y las emisiones de gases de efecto invernadero o el potencial de calentamiento global (GPW).

Las definiciones de las categorías de impacto incluyen: ²⁴

- **El Potencial de agotamiento de ozono:** La disminución de ozono en la estratosfera de la Tierra. El agotamiento de la capa de ozono aumenta la cantidad de radiación ultravioleta B (UVB) de onda corta que alcanza la superficie de la Tierra. La UVB es generalmente aceptada como un factor que contribuye al cáncer de piel, las cataratas y la disminución del rendimiento de los cultivos.
- **Potencial de creación de ozono fotoquímico “Smog”:** El ozono en la troposfera es un constituyente del smog que es causado por una reacción entre la luz del sol, el óxido de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles (VOC, por sus siglas en inglés). El mismo es una causa conocida de problemas de salud respiratorios y daños a la vegetación.
- **Potencial de acidificación:** Un proceso por el cual los contaminantes se convierten en sustancias ácidas que degradan el medio ambiente natural. Los resultados comunes de esto son los lagos y ríos acidificados, la lixiviación de metales tóxicos, los daños forestales y la destrucción de edificios.
- **Potencial de eutrofización:** Un aumento en los niveles de nutrientes liberados al medio ambiente. Un resultado común de esto es la alta productividad biológica que puede conducir a la falta de oxígeno, así como a un impacto significativo en la calidad del agua, que afecta a todas las formas de vida acuática y vegetación.
- **Potencial de calentamiento global:** Aumento de la temperatura media de la Tierra, principalmente a través de la liberación de gases de efecto invernadero. Los resultados comunes son el aumento de los desastres naturales y el aumento del nivel del mar.

La extracción y el procesamiento de las materias primas son los responsables principales del agotamiento del ozono y la emisión de gases de efecto invernadero, tanto para las tuberías de agua como para las de alcantarillado. Sin embargo, la instalación es el responsable de las categorías restantes de contaminación, acidificación y eutrofización. Este informe investiga estas etapas con más detalle y analiza las iniciativas que tiene y está tomando la industria para reducir estos impactos ambientales de las tuberías de PVC.

4.2 Demanda de energía acumulada (energía incorporada)

Demanda de energía acumulada (CED, por sus siglas en inglés) es otro término para denominar energía incorporada y es un importante punto de referencia utilizado para muchos productos, incluidas las tuberías. La demanda de energía acumulada es la suma de todas las fuentes de energía extraídas directamente de la tierra, como el gas natural, el petróleo, el carbón, la biomasa o la energía hidroeléctrica utilizados para producir un producto. La energía de la materia prima es la energía potencial del material contenido en el producto. Esta energía se conoce a menudo como el valor calórico (alto o bajo) o valor calorífico (neto o bruto). Para las tuberías de PVC, la fuente de material de alimentación es el gas natural utilizado para hacer de etileno. La energía del combustible es la energía liberada cuando se quema combustible para fabricar el producto. Por lo tanto, a diferencia de la energía del combustible, la energía de la materia prima no se consume en el proceso de fabricación del producto y no contribuye a la creación de CO₂ u otros contaminantes. El CED para sistemas de tuberías se tabula y se resume en la Tabla 4.1.

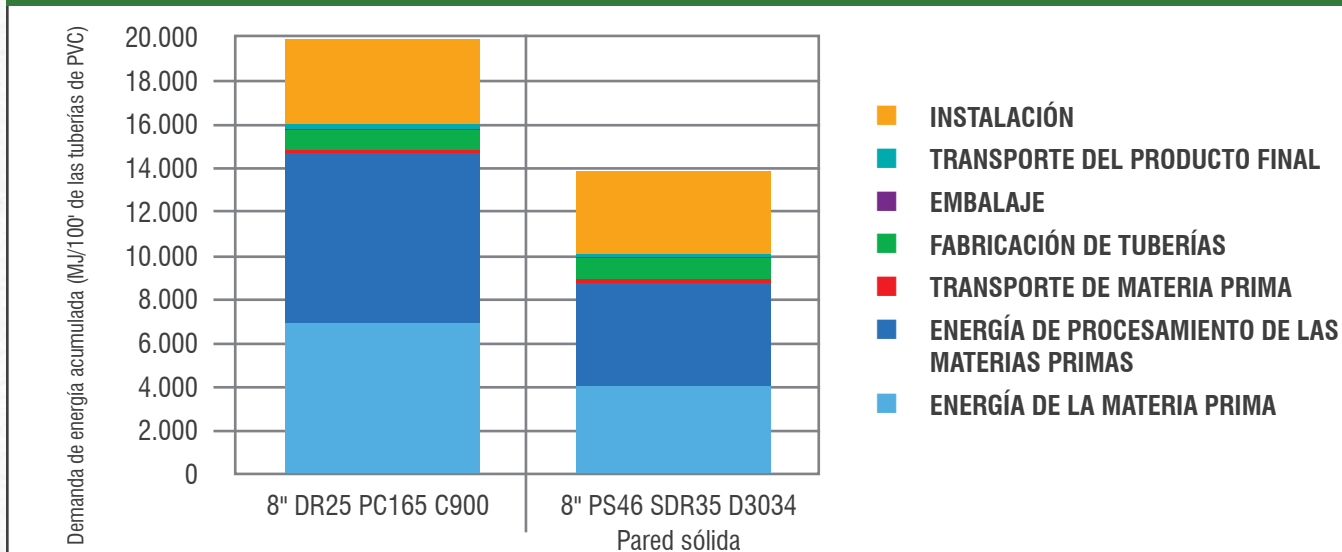
Las materias primas de procesamiento de energía y la energía de la materia prima son los principales responsables de la demanda de energía acumulada; sin embargo, la etapa de instalación es también un gran responsable del CED.

La energía incorporada inicial está influenciada por la fuente de materia prima, el producto de la tubería y la naturaleza de la instalación, como se muestra en la Figura 4.1. La etapa de uso también consume energía, pero se muestra por separado en una sección posterior. Durante la etapa de uso, cualquier energía incorporada recurrente (energía consumida para mantener, reparar, restaurar, remodelar o reemplazar materiales, componentes o sistemas durante el uso de las tuberías) debe ser tomada en cuenta. Los estudios de LCA que no se extienden a la misma vida útil de 100 años para materiales para tubería pierden la energía incorporada y el costo de los impactos ambientales de rehabilitación y si es necesario, durante el tiempo especificado, los impactos requeridos para el reemplazo de las tuberías.

TABLA 4.1 : DEMANDA GENERAL DE ENERGÍA ACUMULATIVA DEL CICLO DE VIDA PARA TUBERÍAS DE PVC (MJ/100')

Etapas del ciclo de vida	8" DR25 PC165 C900	8" PS46 SDR35 D3034 Pared sólida
Materias primas	1.5E + 04	8.7E + 03
<i>Energía de la materia prima</i>	7.0E + 03	4.1E + 03
<i>Energía del procesamiento de la materia prima</i>	7.7E + 03	4.6E + 03
Transporte de la materia prima	1.3E + 02	1.1E + 02
Fabricación de tuberías	9.7E + 02	1.2E + 03
Embalaje	4.4E + 01	4.2E + 01
Total de cuna-a-puerta	1.6E + 04	1.0E + 04
Cuna-a-puerta menos energía de materia prima	8.9E + 03	5.9E + 03
Transporte del producto final	2.0E + 02	1.0E + 02
Instalación	3.8E + 03	3.7E + 03
Total	2.0E + 04	1.4E + 04
Total, menos la energía de la materia prima	1.3E + 04	9.8E + 03

FIGURA 4.1 : DEMANDA GENERAL DE ENERGÍA ACUMULADA DEL CICLO DE VIDA CUNA-A-INSTALACIÓN DE LAS DISTINTAS ETAPAS DEL CICLO DE VIDA DE LAS TUBERÍAS DE PVC (MJ/100')



4.3 Emisiones de gases de efecto invernadero (Potencial de Calentamiento Global) e impactos ambientales de las TRACI

Se emite dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero cuando se queman combustibles fósiles. Las emisiones de gas de efecto invernadero (GHG, por sus siglas en inglés) también pueden ser el resultado de una serie de otras actividades humanas, incluida la liberación de metano de los vertederos. Estos gases pueden atrapar el calor cerca de la tierra y contribuyen al calentamiento global. En septiembre de 2013, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) concluyó que “es muy probable que la influencia humana haya sido la causa principal del calentamiento observado desde mediados del siglo XX”, con un intervalo de confianza del 95 %.²⁵ El GWP de la emisión de una actividad se calcula sobre la base de los kilogramos de equivalentes de dióxido de carbono (CO₂ eq).

Solo se requiere una cantidad modesta de energía para la extrusión de tuberías de PVC, por lo que la fabricación es un pequeño contribuyente de emisiones de gases de efecto invernadero en el análisis cuna-a-instalación. La Tabla 4.2 y la Figura 4.2 muestran las emisiones de gases de efecto invernadero para las diferentes etapas del ciclo de vida de las tuberías de PVC para agua potable y alcantarillado. La Tabla 4.3 y la Figura 4.3 muestran los impactos ambientales de las TRACI para tubería de presión de PVC DR25 PC165 AWWA C900 PVC de 8 pulgadas. Consulte la Tabla 4.4 y la Figura 4.4 para ver los impactos ambientales de las TRACI para las tuberías de PVC para alcantarillado de pared sólida PS46 SDR35 ASTM D3034 de 8 pulgadas.

TABLA 4.2 : IMPACTO GENERAL DE LAS EMISIONES DE GHG DEL CICLO DE VIDA CUNA-A-INSTALACIÓN DE LAS TUBERÍAS DE PVC (KG CO₂ EQ POR 100')

Etapa del ciclo de vida	8" DR25 PC165 C900	8" PS46 SDR35 D3034 Pared sólida
Materias primas	680	400
Transporte de la materia prima	9	8
Fabricación de tuberías	77	73
Embalaje	2	2
Transporte del producto final	15	8
Instalación	178	250
Total	960	740

FIGURA 4.2 : IMPACTO GENERAL DE LAS EMISIONES DE GHG DURANTE EL CICLO DE VIDA CUNA-A-INSTALACIÓN DE LAS TUBERÍAS DE PVC (KG CO₂ EQ POR 100')

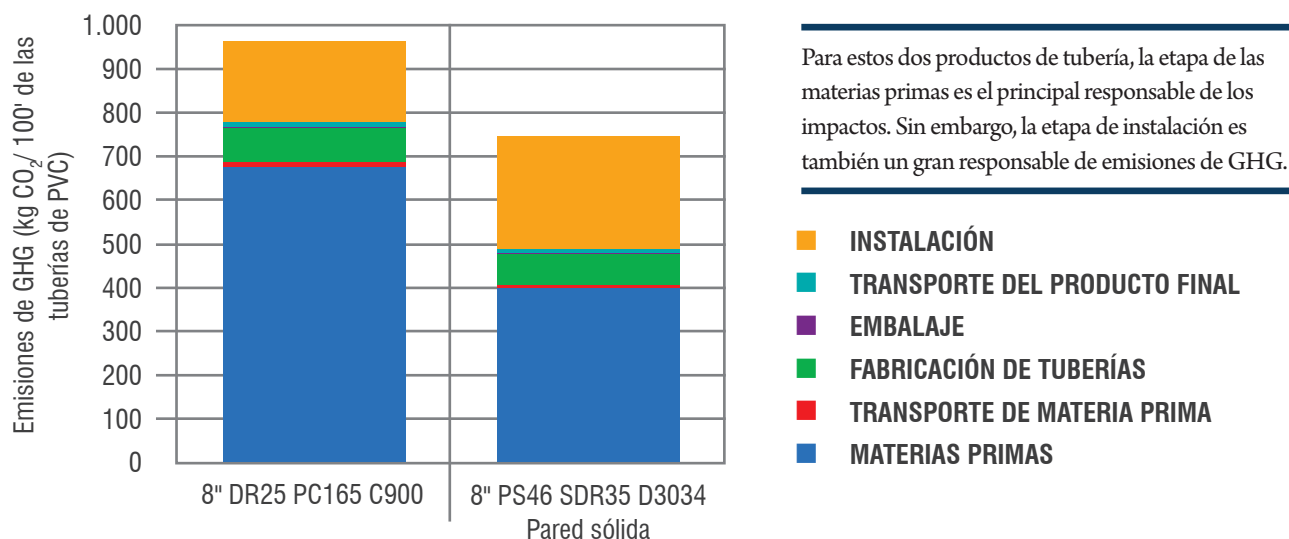


FIGURA 4.3 : IMPACTOS AMBIENTALES DE LA TUBERÍA DE PRESIÓN DE PVC DR25 PC165 C900 DE 8" (METODOLOGÍA TRACI DE EVALUACIÓN DEL IMPACTO)

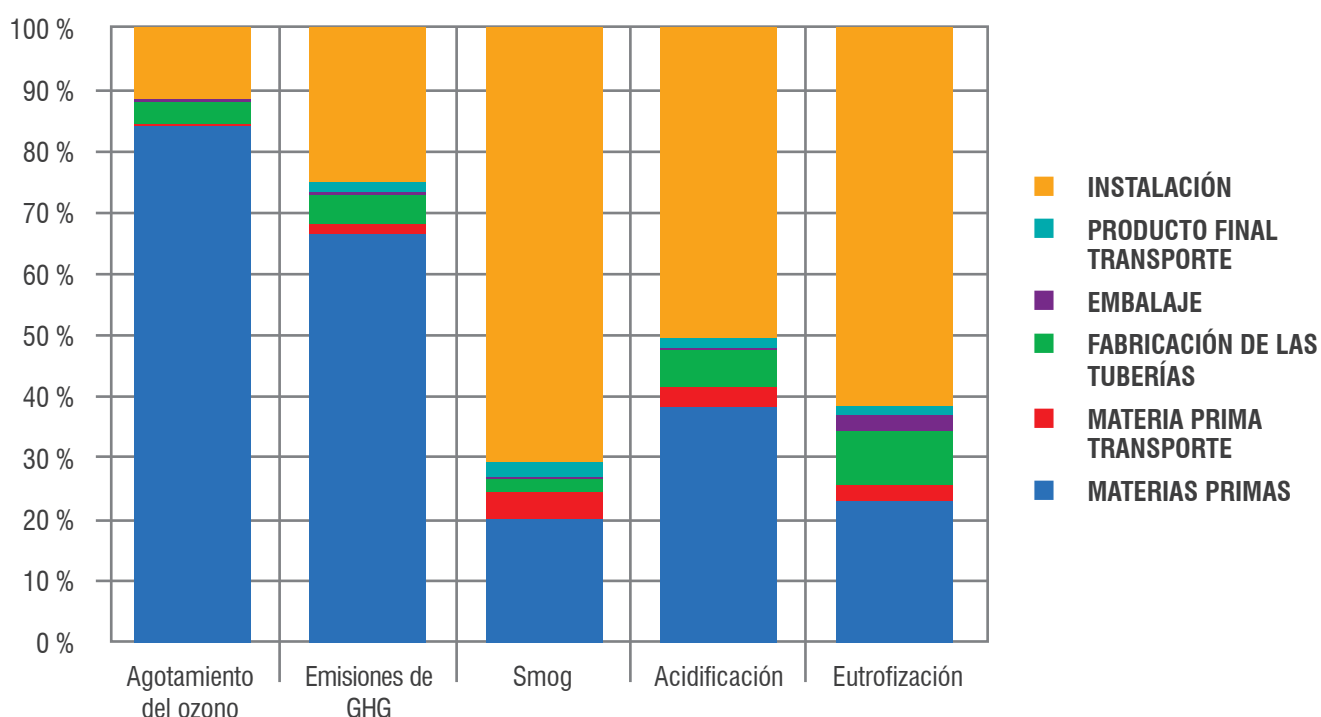


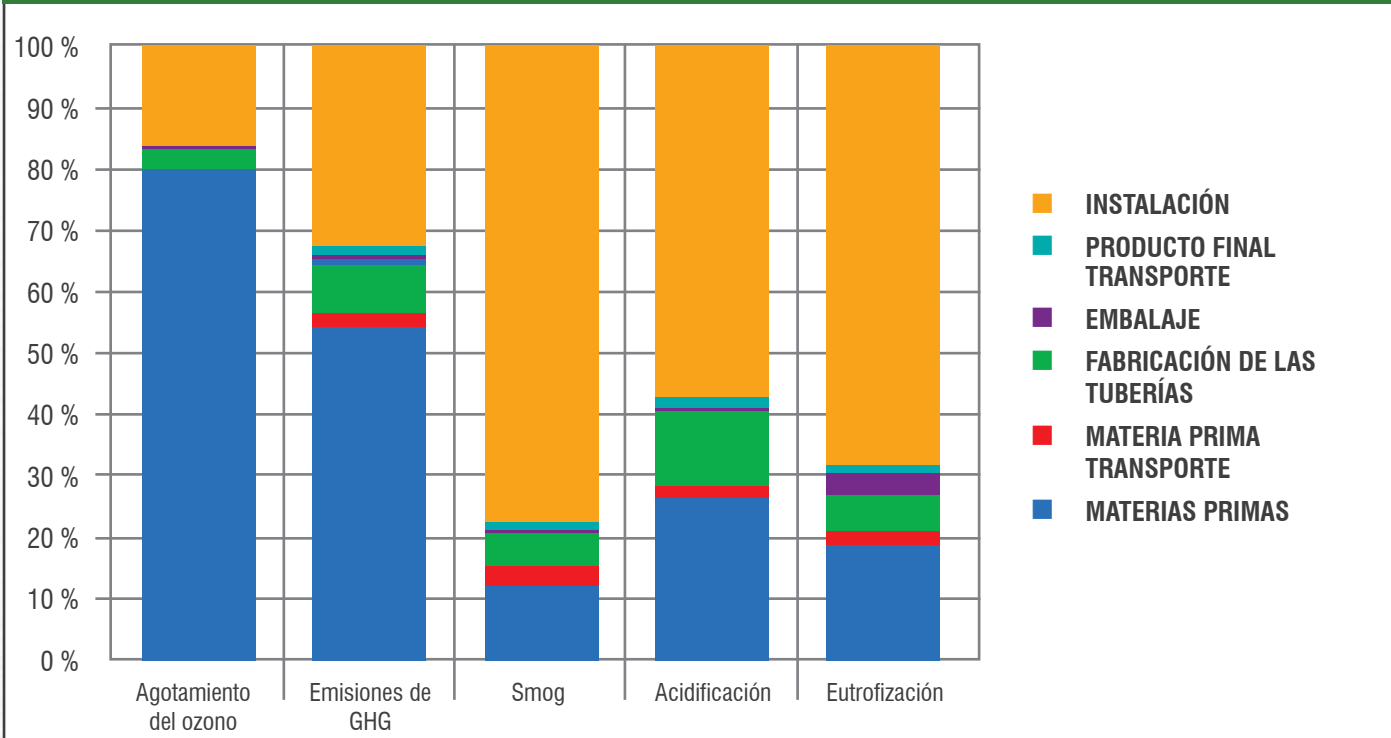
TABLA 4.3 : IMPACTO AMBIENTAL DE LAS TUBERÍAS DE PRESIÓN PVC DR25 PC165 C900 DE 8 PULGADAS UTILIZANDO LA METODOLOGÍA TRACI DE EVALUACIÓN DEL IMPACTO

Categoría del impacto	Unidad por 100 pies.	Materias primas		Fabricación		Construcción		Total
		Extracción y procesamiento de materias primas	Transporte de la materia prima	Proceso de fabricación	Embalaje	Transporte del producto final	Instalación	
Agotamiento del ozono	kg CFC-11 eq	3.9E - 05	3.5E - 10	9.6E - 07	1.1E - 07	5.7E - 10	5.2E - 06	4.6E - 05
Emisiones de GHG	kg CO ₂ eq	6.8E + 02	9.3E + 00	4.9E + 01	1.9E + 00	1.5E + 01	2.5E + 02	1.0E + 03
Smog	kg O ₃ eq	2.4E + 01	5.1E + 00	2.9E + 00	1.3E - 01	2.4E + 00	8.5E + 01	1.2E + 02
Acidificación	mol H ⁺ eq	1.3E + 02	9.0E + 00	2.0E + 01	5.7E-01	5.0E + 00	1.7E + 02	3.3E + 02
Eutrofización	kg N eq	1.4E - 01	9.6E - 03	5.2E - 02	1.5E - 02	5.0E - 03	3.8E - 01	6.0E - 01

TABLA 4.4 : IMPACTO AMBIENTAL DE LA TUBERÍA DE PVC DE DRENAJE SANITARIO PS46 SDR35 D3034 PARED SÓLIDA DE 8 PULGADAS, UTILIZANDO LA METODOLOGÍA TRACI DE EVALUACIÓN DEL IMPACTO

Categoría del impacto	Unidad por 100 pies.	Materias primas		Fabricación		Construcción		Total
		Extracción y procesamiento de materias primas	Transporte de la materia prima	Proceso de fabricación	Embalaje	Transporte del producto final	Instalación	
Agotamiento del ozono	kg CFC-11 eq	2.4E - 05	3.0E - 10	5.4E - 07	1.0E - 07	2.9E - 10	5.2E - 06	2.9E - 05
Emisiones de GHG	kg CO ₂ eq	4.0E + 02	7.8E + 00	7.3E + 01	1.7E + 00	7.5E + 00	2.5E + 02	7.4E + 02
Smog	kg O ₃ eq	1.5E + 01	3.2E + 00	4.5E + 00	1.3E - 01	1.2E + 00	8.5E + 01	1.1E + 02
Acidificación	mol H ⁺ eq	7.7E + 01	5.7E + 00	3.2E + 01	5.4E - 01	2.5E + 00	1.7E + 02	2.8E + 02
Eutrofización	kg N eq	1.1E - 01	6.0E - 03	3.6E - 02	1.6E - 02	2.5E - 03	3.8E - 01	5.4E - 01

FIGURA 4.4 : IMPACTOS AMBIENTALES DE LAS TUBERÍAS DE PVC PARA DRENAJE SANITARIO PS46 SDR35 D3034 PARED SÓLIDA DE 8" (METODOLOGÍA TRACI DE EVALUACIÓN DEL IMPACTO)



5.0

TUBERÍA DE CUNA-A-PUERTA

30

Con la adopción de productos sustentables y mejoras en el diseño, la industria de la resina de PVC ha dado grandes pasos en la reducción de las emisiones y los impactos ambientales durante la extracción de la materia prima y el procesamiento de materiales para producir la resina de PVC. Como se evidencia en este informe, las materias primas y las etapas de instalación son los principales responsables de los posibles impactos ambientales de las etapas del ciclo de vida de la cuna a la instalación de las tuberías de PVC. Esta sección profundiza en el progreso que se ha producido en la producción ascendente de la resina de PVC para la producción de tuberías, del mismo modo, investiga el proceso de producción de las tuberías.

5.1 Extracción y producción de materias primas

La producción de la resina de PVC utiliza un monómero de cloruro de vinilo (VCM, por sus siglas en inglés), que se produce a partir de cloro y etileno. El cloro se fabrica a partir de la sal, predominantemente a través de la electrólisis de célula de membrana/diafragma. El uso de esta tecnología, en comparación con el proceso de celdas de mercurio anterior, reduce significativamente el consumo de energía, las emisiones y los residuos peligrosos. En los Estados Unidos y Canadá, más del 99 % de la resina de PVC se produce a partir del monómero de cloruro de vinilo que se fabrica utilizando la electrólisis de célula de membrana/diafragma.²⁶

Las tuberías de PVC hechas en los EE. UU. y Canadá no contienen plomo.

Las preocupaciones con respecto al cloruro de vinilo vienen de las emisiones a la atmósfera durante la producción de la resina, no de la fabricación y el uso de las tuberías de PVC. Las emisiones a la atmósfera durante la producción de resina se han reducido de forma constante desde 1987. Según el Instituto del Vinilo, la producción de resina de PVC se ha incrementado en un 76 % desde 1987, pero las emisiones de cloruro de vinilo publicadas utilizando el Inventario de emisiones tóxicas (TRI, por sus siglas en inglés) de la Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. han disminuido en un 75 % durante el mismo período.²⁷ Con los años, la reducción de las emisiones de cloruro de

vinilo ha provocado una reducción del impacto medioambiental global de la etapa de las materias primas del ciclo de vida.

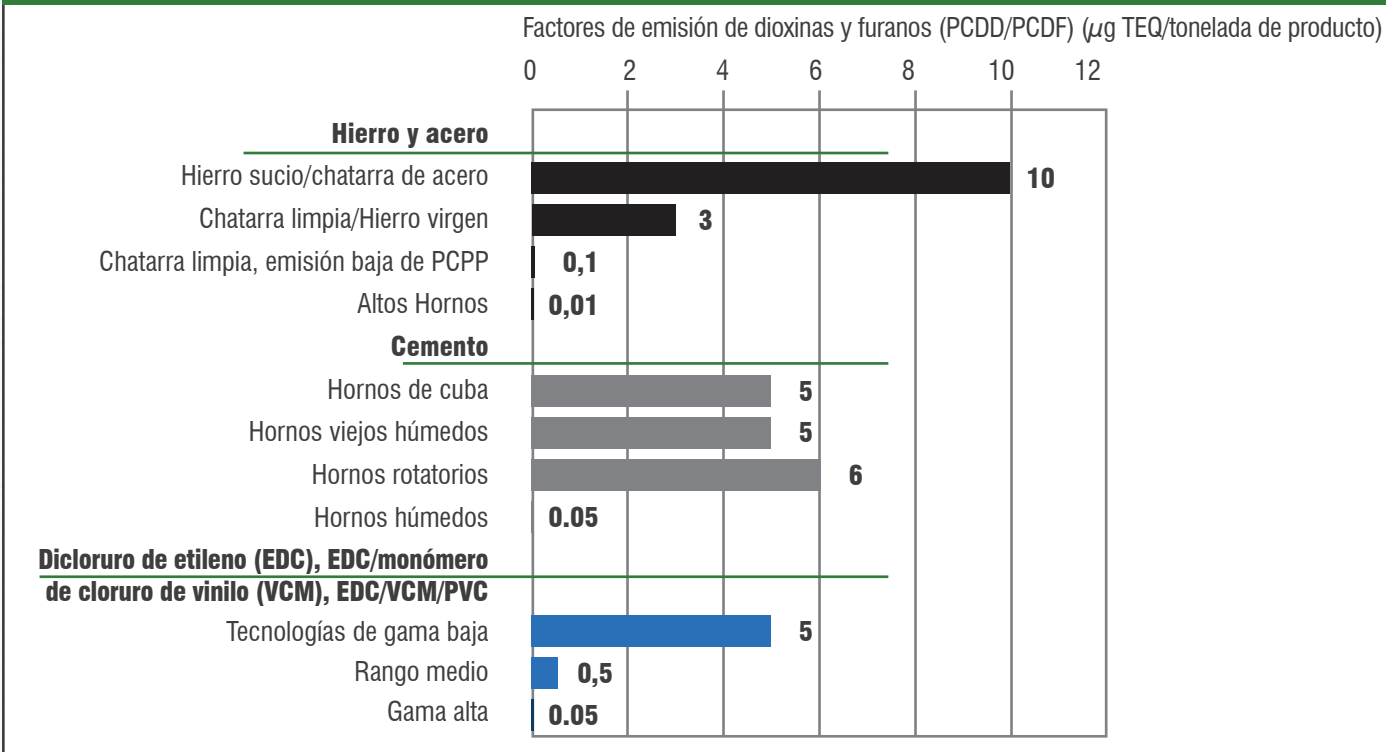
Las tuberías de PVC rígido fabricadas en los Estados Unidos y Canadá no contienen plastificantes, tales como Ftalato de bis (2-etilhexilo) (DEPH), BPA, u otro tipo de ftalatos. Las tuberías de PVC hechas en los EE. UU. y Canadá tampoco contienen plomo. La industria de las tuberías de PVC de América del Norte utiliza un estabilizador térmico a base de estaño. Se utilizan muy pequeñas cantidades de estabilizadores de calor en los productos de PVC para facilitar el procesamiento a elevadas temperaturas de extrusión requeridas durante la fabricación.

5.1.1 Informe de emisiones

También se ha producido una tendencia descendente similar en las emisiones de dioxinas a lo largo de los años. Las emisiones de dioxina de la resina de PVC se emiten actualmente a una tasa de menos de una parte por billón de resina de PVC producida. El Inventario de Emisiones Tóxicas de la EPA y el informe del Instituto del Vinilo mostraron que las emisiones de dioxinas han disminuido en un 79 % entre el 2000 y el 2011.²⁸

Ha habido preocupaciones por parte de algunos grupos sobre las emisiones de dioxinas del PVC, sin embargo, la producción de resina de PVC no es la única industria que produce dioxinas. Los procesos de fabricación del hierro dúctil, el hierro fundido para fontanería y las tuberías de hormigón también producen dioxinas. El total de la producción de resina de PVC para tuberías es responsable de menos del 0,09 % de la dioxina total liberada en el medio ambiente en los Estados Unidos, en comparación con los camiones diésel (aprox. 5 %), el equipo pesado (aprox. 2 %) y la quema industrial de madera (aprox. 3 %), que son responsables de la producción de más cantidad de dioxina anualmente.²⁹

FIGURA 5.1 : FACTORES DE EMISIÓN DE DIOXINAS ESTIMADAS POR LA UNEP DE LAS FUENTES DE PRODUCCIÓN DETERMINADAS



Según la EPA y el Programa Medioambiental de las Naciones Unidas (UNEP, por sus siglas en inglés), la sinterización de metal y la producción de magnesio (ambos utilizados en la producción de acero y de hierro) y la producción de electricidad por carbón son también las principales fuentes de emisión de dioxinas.^{30 31 32} El UNEP tiene factores de emisión estándar para las instalaciones que son las principales fuentes de emisión de dioxinas.³³ Puede ver un ejemplo de estos factores en la Figura 5.1. GreenSpec® ha eliminado la tubería de desagüe de hierro fundido de sus listados debido a las altas emisiones de energía y de contaminación que emiten las plantas de coque.³⁴

Al seleccionar los materiales de las tuberías es importante utilizar el concepto del ciclo de vida y entender todos los impactos de los materiales, especialmente las emisiones durante la fase de fabricación.

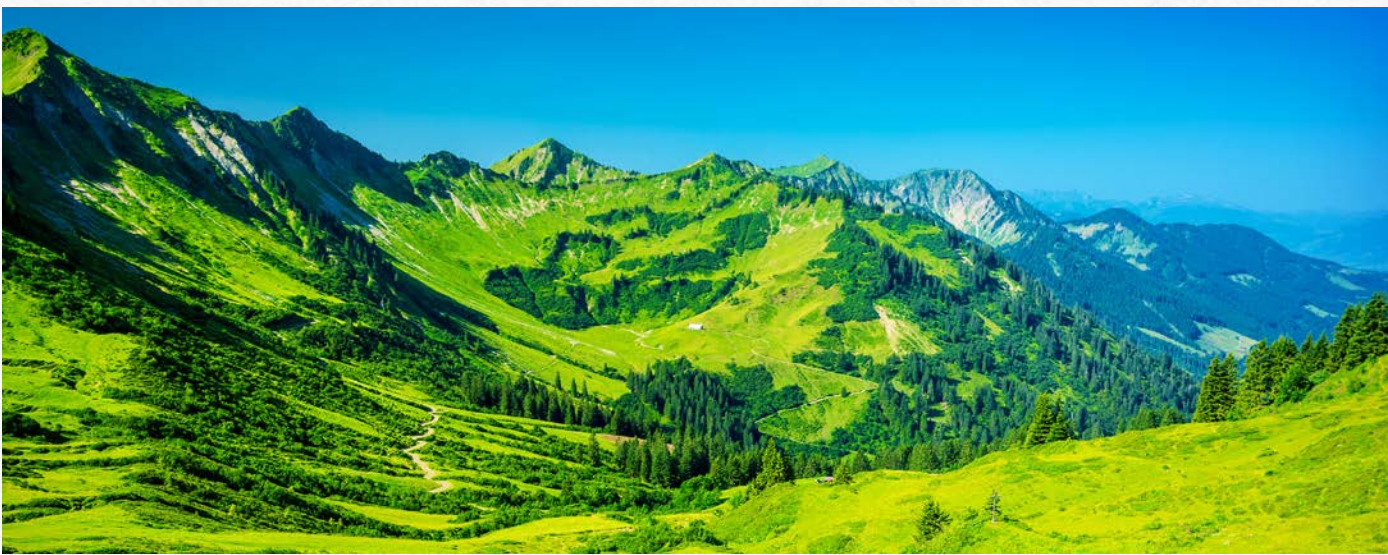
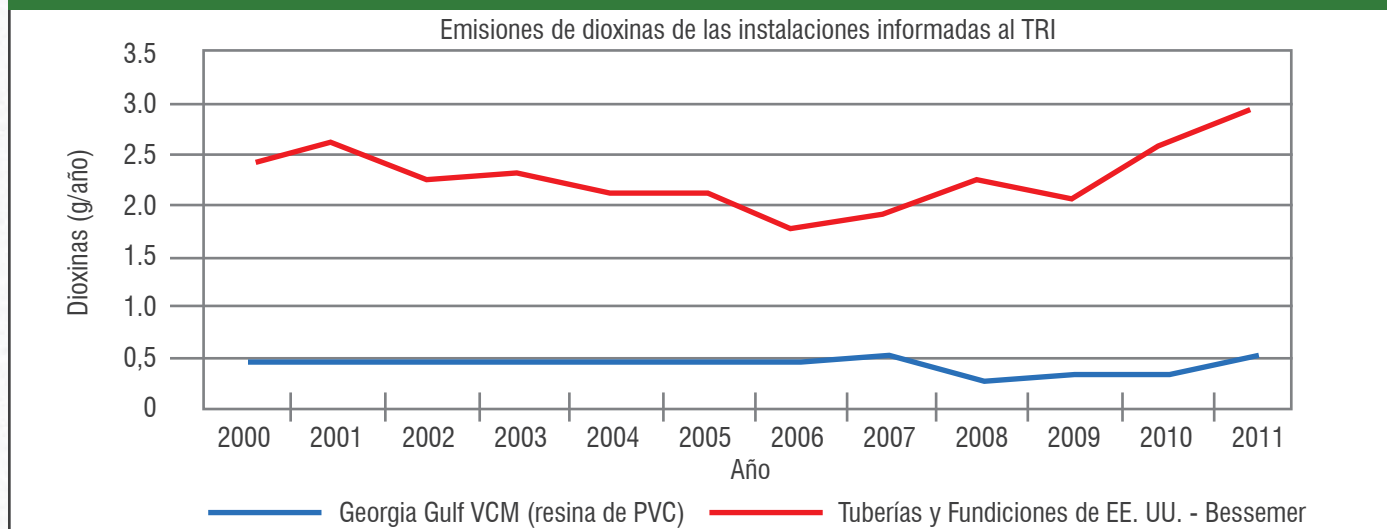


FIGURA 5.2 : EMISIONES DE DIOXINA ANUALES DE UNA PLANTA DE RESINA DE PVC CON VCM Y UNA PLANTA DE TUBERÍAS DE HIERRO DÚCTIL EN EL INVENTARIO DE EMISIONES TÓXICAS DE LA EPA DE EE. UU.



La EPA de EE. UU. controla las emisiones de dioxinas a través del Inventario de emanaciones tóxicas (TRI, por sus siglas en inglés). Los datos del TRI están a disposición del público. La Figura 5.2 es una muestra de las emisiones de dioxinas informadas por un fabricante de VCM (resina de PVC) y un fabricante de hierro dúctil.³⁵

Como se muestra en la figura 5.2, la instalación de resina de PVC informa menos emisiones de dioxina que la planta de hierro dúctil. Esta ilustración confirma que la emisión de dioxinas es también una preocupación para otros materiales para tubería.

La EPA de EE. UU. ha desarrollado regulaciones para controlar y reducir las emisiones de contaminantes tóxicos del aire de las fundiciones de hierro. Las regulaciones de la EPA para fundiciones de hierro y acero se publicaron en abril de 2004 y la EPA afirma que las regulaciones han reducido las partículas en suspensión, el total de contaminantes atmosféricos peligrosos provenientes de los metales (HAP) compuestos de cadmio, cromo, plomo, manganeso y níquel, así como los HAP orgánicos, entre los cuales se incluye el benceno, dioxina, formaldehído, metanol, naftaleno y trietilamina. Los efectos en la salud asociados con la exposición a estos contaminantes pueden incluir el cáncer y trastornos crónicos o agudos de los sistemas respiratorio, reproductivo y nervioso central.³⁶

Muchas instalaciones de hierro dúctil también informan sobre las emisiones de metales pesados como el plomo y el mercurio, así como una serie de otras emisiones químicas tóxicas. Las cinco emisiones principales a la atmósfera durante la producción de las tuberías de hierro dúctil son: trietilamina, xileno, metanol, fenol y amoníaco, que se crean durante el proceso de moldeo del hierro dúctil. La escoria y el polvo generados en el proceso de producción también pueden estar contaminados con compuestos de manganeso, zinc, plomo y cromo.^{37 38 39}

Los informes de las emisiones de la industria del hierro se basan en factores de emisión de la compilación AP-42 de los Factores de emisión de contaminantes del aire: fuentes de puntos y áreas estacionarias.⁴⁰ En el Proyecto de la política de dioxinas de la EPA, se observaron las dioxinas en el procesamiento de los minerales para obtener los metales,

incluso en la producción secundaria de la recuperación de metales a partir de chatarra. La Sociedad Estadounidense de Fundición ha señalado que debido a la mala calidad de algunas pilas de protocolos de pruebas, los informes de los factores de emisión para la producción de hierro pueden ser subestimados. Por otra parte, se ha demostrado que la producción de hierro secundario utilizando chatarra de hierro emite incluso más contaminantes que la producción de hierro primario.

“El reciclado del metal tiene el potencial de formar niveles más altos de dioxinas debido a que el metal de desecho generalmente contiene pinturas, aceites, recubrimientos, plásticos y otras impurezas que pueden proporcionar tanto cloro como carbono. En este caso, las dioxinas se pueden generar durante el pretratamiento de los desechos para eliminar estas impurezas o durante el refinado del metal en los hornos de refinería (fundición). Las dioxinas también pueden proceder de combustibles quemados en los hornos. Además, las operaciones de fundición implican la fusión y el vertido del metal caliente en los moldes. Estos procesos de alta temperatura también pueden resultar en emisiones de dioxina, dependiendo del material del molde. Las emisiones de dioxina de la producción de metales se describen mal, en parte porque una gran fracción de las emisiones son fugitivas y, por lo tanto, no salen a una chimenea específica en la que puedan medirse”.⁴¹

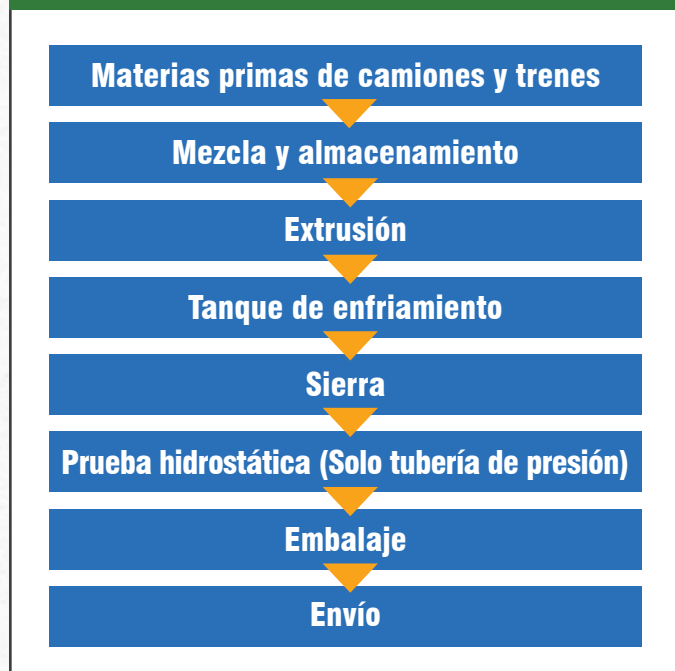
5.2 Producción de tuberías

La fabricación de tuberías de PVC es un proceso muy eficiente. Se requieren bajas entradas de energía y agua y tiene la capacidad de volver a ingresar inmediatamente los materiales de desecho directamente al proceso de fabricación como material molido. Prácticamente no hay ningún residuo de fabricación.

La resina de PVC y algunos aditivos se mezclan y luego se extruden para hacer las tuberías de un diámetro y espesor de pared específicos. La tubería extruida se enfría luego con agua. El agua de refrigeración está generalmente en un proceso de circuito cerrado, lo que ahorra millones

de galones de agua cada año por instalación. El incremento en el uso de la tecnología de la conservación del agua en un circuito cerrado demuestra el compromiso de la industria de las tuberías de PVC para la mejora y la eficiencia continua. Después del proceso de enfriamiento, las tuberías se cortan en longitudes estándar con una sierra eléctrica, y un extremo de cada tubería se pone en una máquina acampanadora para lograr la forma de campana. A cada longitud estándar de tubería utilizada en el sistema de agua potable municipal se le hace una prueba de presión en la línea de producción. Las tuberías acabadas se disponen en marcos de madera y se sujetan, se cargan en un camión o carro de tren, y se envían a un distribuidor o sitio de trabajo. Casi todo el material de desecho se muele y se vuelve a colocar en la extrusora, lo que resulta en muy poco desperdicio. El proceso de fabricación utiliza pequeñas cantidades de electricidad, lo cual hace que casi no haya emisiones. La Figura 5.3 resume las etapas implicadas en el proceso de fabricación de tuberías de PVC.

FIGURA 5.3 : DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO PARA LAS TUBERÍAS DE PVC



Desde la introducción generalizada original de las tuberías de PVC en la década de 1960, la industria de las tuberías de PVC ha continuado innovando y a su vez mejora el rendimiento de fabricación. El LCA de las tuberías de PVC utiliza datos de 2012 proporcionados por los fabricantes de resina de PVC para dar cuenta de la tecnología más reciente en uso. Mediante el uso de estos datos, el LCA refleja con precisión la producción actual de tuberías de PVC.

La fabricación típica de hierro dúctil incluye el uso de metales de desecho, ingredientes de aleación, arena y ligadura metálica. La mayor fuente de metal reciclado para tubería de hierro dúctil son los automóviles de descarte. Este tipo de desecho es el más difícil de usar debido a que la composición química es variable y puede incluir mercurio (un contaminante del aire volátil) y otras toxinas.⁴²⁻⁴³ Si un horno de cubilote se utiliza en el proceso de producción de hierro dúctil, también se necesitan coque y piedra caliza para la formación de escoria.⁴⁴ La chatarra y el metal reciclado se funden y, a menudo

se inyectan con aleaciones tales como magnesio.⁴⁵ El hierro fundido se cuela usando el método de colada centrífuga. La tubería de hierro dúctil se enfría, se recuece y luego se somete a acabado para su aplicación de uso final.⁴⁶ Se genera escoria y polvo como residuo. El consumo de energía en una fundición de hierro es alta: una cúpula de hierro dúctil utiliza un estimado de 13,7 MJ por kilogramo de hierro dúctil y un proceso de inducción de hierro dúctil utiliza 29,2 MJ por kilogramo de hierro dúctil.⁴⁷

Las tuberías de fundición o de hierro dúctil viejas rara vez se reciclan. En caso que cualquier tubería de hierro instalada antes de la década de 1950 se recicle, se debe tener especial cuidado ya que es probable que tengan juntas de plomo. Las tuberías de hierro con juntas de plomo se deben retirar del suelo y se deben desechar como residuo peligroso.

5.3 Materiales reciclados

La reciclabilidad es un atributo a tener en cuenta en el análisis ambiental de un producto. Las tuberías de PVC pueden volver a reciclarse a tuberías de PVC. La capacidad de reciclar el material de nuevo en un artículo del mismo valor o equivalente se denomina producto de ciclo cerrado. El reciclado en ciclo cerrado es a menudo una forma de reducir los impactos del ciclo de vida y de conservar los recursos. Durante la producción, los fabricantes de tuberías de PVC pueden rectificar los desechos de fabricación e integrarlos de nuevo en el producto, lo que reduce significativamente los residuos de la operación de fabricación. Todas las tuberías de presión y de PVC sin presión fabricadas en América del Norte están autorizadas a utilizar triturado interno. El uso de material triturado interno impide los volúmenes considerables de desechos que van a los vertederos.

Debido a que las tuberías de PVC se instalan en el suelo, generalmente es económicamente inviable excavar al finalizar la vida útil de la misma con el fin de reciclarla. Además, para todos los materiales de las tuberías, la energía necesaria para la excavación podría contrarrestar los beneficios del reciclaje. Sin embargo, las tuberías de PVC excavadas por otras razones (por ejemplo, nueva construcción) tienen un alto potencial de reciclado y se pueden reciclar mecánicamente en un producto de tubería que realice la misma función estructural que uno hecho solo de material virgen.

Hay investigaciones en curso sobre el ciclo de vida del circuito cerrado de las tuberías de PVC. De hecho, un estudio reciente muestra que las propiedades mecánicas de las tuberías de PVC que utilizan un 100 % de contenido reciclado no cambian incluso después de ocho ciclos de molienda y extrusión del mismo material.⁴⁸

El contenido reciclado, como un solo atributo, no siempre es un indicador relevante de bajo impacto ambiental. Como ejemplo, se requiere una cantidad relativamente grande de energía para procesar los metales reciclados para la fabricación de las tuberías de hierro dúctil. La producción de tuberías de PVC usando material virgen tiene un menor consumo energético que la producción de tubería de hierro dúctil con materiales reciclados, lo que resulta en un menor número de impactos ambientales para proyectos de infraestructura hídrica.

6.0

INSTALACIÓN DE TUBERÍAS

Como se muestra en los resultados globales del ciclo de vida, la instalación de tuberías es una etapa importante con posibles impactos ambientales para las tuberías de PVC. Debido a que la instalación es muy variable, lo siguiente será discutir los diferentes aspectos y consideraciones de la etapa de instalación de los sistemas de tuberías de PVC, a pesar de la facilidad de instalación.

34

6.1 Transporte de las tuberías

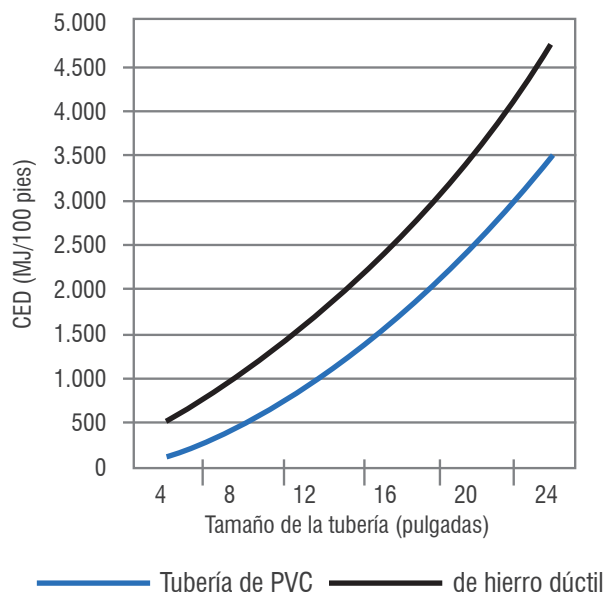
El peso ligero de las tuberías de PVC contribuye a reducir el impacto ambiental del transporte (y los costos) y permite que la manipulación de las tuberías sea más fácil una vez que llega al sitio de trabajo (ver Figura 6.1).

6.2 Impactos ambientales potenciales de la instalación de tuberías

Se supone que la instalación de las tuberías de PVC es similar a la instalación de las tuberías hechas de otros materiales. La instalación requiere la excavación y el relleno de una zanja. La profundidad y el tiempo necesario para excavar y rellenar una zanja varían ampliamente según la región, el tipo de suelo, el clima, la infraestructura, el operador del equipo, la convención local y otros factores existentes; por lo tanto, el tiempo de instalación y el esfuerzo real son muy variables. Para las tuberías de 8 pulgadas, el ancho de la zanja debe ser de al menos 24 pulgadas. Para las tuberías de 24 pulgadas, la zanja debe estar entre 36 y 48 pulgadas de ancho. Generalmente, se utiliza una excavadora para cavar la zanja y una pequeña cargadora que rellena la zanja.

Existen impactos ambientales que se generan en la instalación de la tubería causados por el uso de combustibles fósiles en el equipo de excavación que emanan gases de efecto invernadero y otras emisiones. Además, la minería de los materiales del lecho y los recursos necesarios para la reparación de los caminos contribuyen a los impactos ambientales en la fase de instalación. El poco peso (25 %

FIGURA 6.1 : DEMANDA DE ENERGÍA ACUMULADA PARA EL TRANSPORTE



del peso del hierro dúctil por pie) y la durabilidad de las tuberías de PVC pueden reducir los impactos y costos de instalación ya que se puede utilizar un equipo de servicio más ligero para manejar las tuberías y se necesita una cuadrilla más pequeña. Mediante el uso de equipos más pequeños, se pueden reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y otras categorías de impacto ambiental.

Debido a que el tiempo de instalación de las tuberías varía mucho, se realizó un breve análisis de sensibilidad sobre la demanda de energía acumulada de la instalación de una tubería de agua de 8 pulgadas.

La Tabla 6.1 y la Figura 6.2 enumeran los valores y muestran gráficamente los resultados de un análisis de sensibilidad del tiempo de instalación para 100 pies de tubería de presión de 8 pulgadas. La reducción del tiempo de instalación de las tuberías es un aspecto clave que se puede buscar en el diseño global del ciclo de vida del producto.

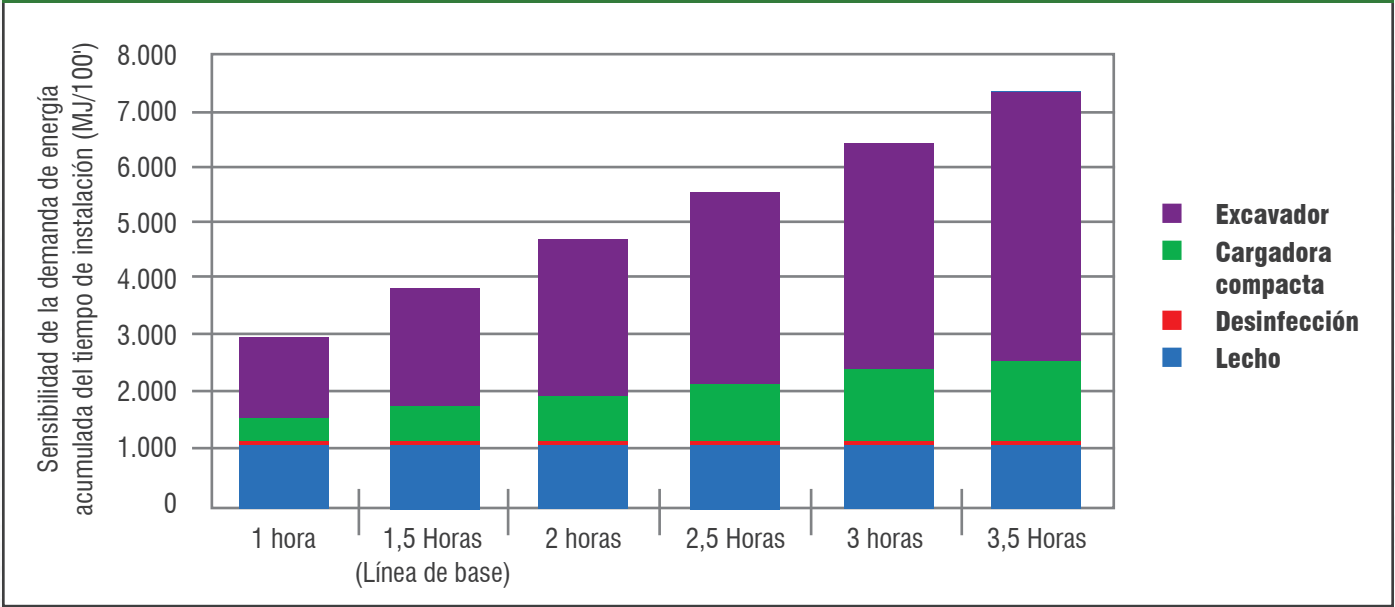
Los costos de tráfico y las pérdidas de ingresos son los dos principales costos para la instalación.⁴⁹ En última instancia, para reducir estos costos, la frecuencia de sustitución y la necesidad de instalar una nueva infraestructura de las tuberías deben reducirse. Por lo tanto, mediante la instalación de las tuberías de PVC de alta duración se mantiene una baja tasa de fallas y no están sujetas a la corrosión. Los costos de instalación y operación se reducirán cuando se amorticen durante el curso de una vida útil prevista de 100 años. Debido a que las tuberías de PVC no requieren reemplazo durante la vida útil prevista de 100 años, se eliminan los costos de tráfico, los impactos ambientales y relacionados con la construcción, así como otras pérdidas de ingresos asociadas con los reemplazos de las tuberías. En una instalación de tuberías de alcantarillado a cielo abierto, el PVC se instaló un 30 % más rápido que las tuberías de concreto.⁵⁰

Al seleccionar los materiales de las tuberías, los diseñadores deben tener en cuenta los costos de instalación y de funcionamiento y los impactos ambientales relacionados.

TABLA 6.1 : ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL TIEMPO DE INSTALACIÓN DE 100' DE TUBERÍAS DE PRESIÓN DE 8" (METODOLOGÍA DE LA DEMANDA DE ENERGÍA ACUMULADA - MJ POR 100')

	1,5 horas (línea de base)	2 horas	2,5 Horas	3 horas	3,5 Horas
Excavador	2.100	2.800	3.500	4.200	4.900
Cargadora compacta	530	700	880	1.100	1.200
Desinfección	70	70	70	70	70
Lecho	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100
Total	3.800	4.700	5.600	6.500	7.300

FIGURA 6.2 : ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL TIEMPO DE INSTALACIÓN DE 100' DE TUBERÍA DE PRESIÓN DE 8" (METODOLOGÍA DE LA DEMANDA DE ENERGÍA ACUMULADA- MJ POR 100')



7.0

ETAPA DE USO Y RENDIMIENTO DE LAS TUBERÍAS DE PVC

La infraestructura de las tuberías de agua y alcantarillado subterráneos tiene una vida útil prevista muy larga. Los costos son significativos para construir estos activos críticos y son aún mayores si la tubería debe ser reemplazada durante la vida útil prevista del sistema. El proceso de diseño del sistema debe centrarse en una vida de servicio sustentable de los productos a largo plazo.

36

7.1 Vida útil de la tubería con un estándar de comparación de 100 años

Se espera que la vida útil del PVC supere los 100 años.^{51 52 53} Sobre la base de más de 60 años de experiencia de campo y ensayos de laboratorio, se utiliza una vida útil de 100 años para el PVC en este estudio. La vida útil de un producto es el tiempo durante el cual el producto se puede utilizar económicamente. El nuevo estándar o meta de una vida de servicio sustentable para la infraestructura de las tuberías subterráneas se considera que es de 100 años. Al determinar la vida útil de una tubería, se deben tener en cuenta las medidas de rendimiento externas e internas y los niveles de servicio de la tubería. Se recomienda que todos los futuros LCA relacionados con los materiales de las tuberías subterráneas utilicen este punto de referencia de 100 años.

Con el fin de distribuir el agua potable durante la vida útil esperada, el agua se presuriza y se bombea a través de las tuberías para entregarse en un destino a una tasa de flujo volumétrico especificado. Al viajar a través de la tubería, el agua crea fricción contra las paredes de

las tuberías lo que causa pérdida de presión a medida que recorre la tubería. Esta fricción requiere potencia de bombeo para superar esta pérdida de carga de presión, lo que agrega costos significativos al sistema. Este estudio analizó los impactos ambientales de esta energía de bombeo. Se utilizó la red eléctrica promedio en Estados Unidos para modelar estos impactos ambientales a lo largo de una vida útil prevista de 100 años.

La Tabla 7.1 y la Figura 7.1 muestran los impactos ambientales del proceso cuna-a-instalación de las tuberías de PVC de 8 pulgadas DR25 en comparación con los impactos de la etapa de uso para 100 años de energía de bombeo con un caudal constante de agua de 336 galones por minuto (gpm), con una eficiencia de energía de bomba del 75 %. La velocidad del caudal de 336 gpm es igual a una velocidad de flujo de 2 pies por segundo (fps) en una tubería de PVC DR25 de 8 pulgadas. Debido a que la demanda de agua se basa en el caudal volumétrico, se utilizó el mismo caudal de 336 gpm para la comparación de todas las alternativas de las tuberías de PVC DR25 de 8 pulgadas. La misma metodología se utilizó para la comparación de las alternativas de tuberías de PVC DR18 de 8 pulgadas y DR25 de 24 pulgadas.

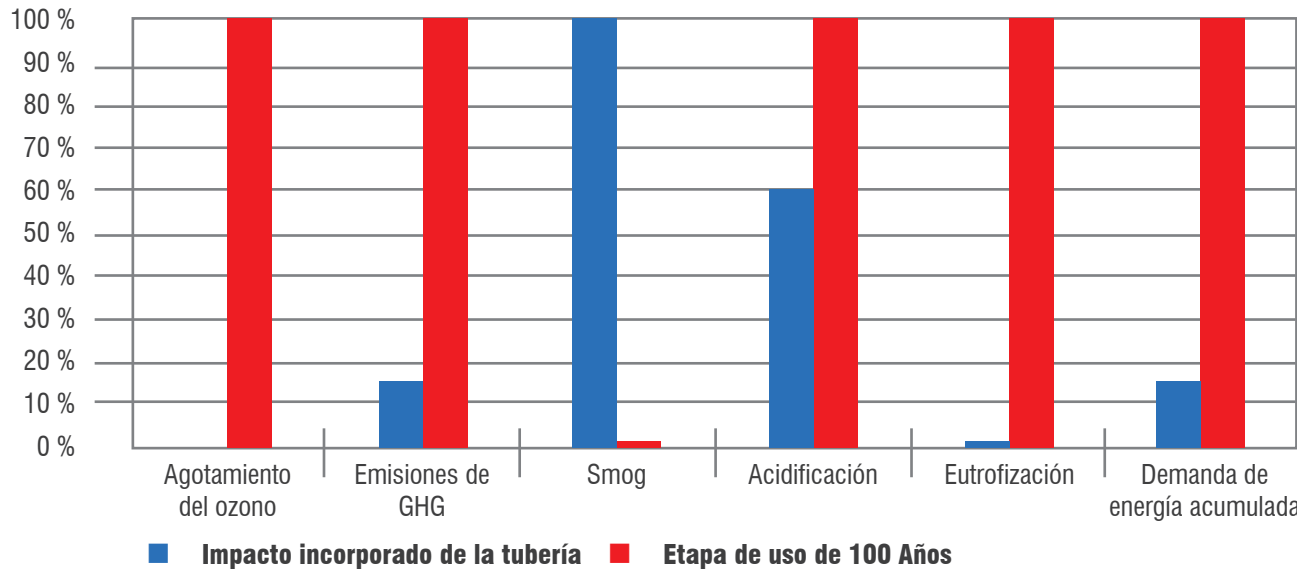
La etapa de uso del ciclo de vida de las tuberías prevalece como la principal causa de los impactos ambientales de las tuberías de PVC a excepción del smog que es causado principalmente por la producción de electricidad y la quema de combustible en el equipo de instalación de las tuberías, y de la extracción y producción de materias primas.



TABLA 7.1 : IMPACTOS AMBIENTALES DE LA ETAPA DE USO DE UNA TUBERÍA DE PVC DE 8" DR25 PC165 C900

Categoría del impacto	Unidad por 100 pies de tubería	Impacto incorporado de la tubería	Etapa de uso de 100 años
Agotamiento del ozono	kg CFC-11 eq	4.6E - 05	9.0E + 03
Emisiones de GHG	kg CO ₂ eq	1.0E + 03	6.1E + 03
Smog	kg O ₃ eq	1.2E + 02	1.1E + 00
Acidificación	mol H ⁺ eq	3.3E + 02	5.5E + 02
Eutrofización	kg N eq	6.0E - 01	7.8E + 01
Demanda de energía acumulada	MJ	2.0E + 04	1.3E + 05

FIGURA 7.1 : IMPACTOS AMBIENTALES DE LA ETAPA DE USO DE LAS TUBERÍAS DE PVC DE 8" DR25 PC165 C900 EN COMPARACIÓN CON LOS IMPACTOS INCORPORADOS DE LA TUBERÍA



8.0

REVISIÓN DE LOS MATERIALES DE LAS TUBERÍAS ALTERNATIVAS

8.1 Metodología de investigación y suposiciones

El propósito de esta sección es establecer las presunciones y los cálculos que respalden las comparaciones de este estudio de vida útil de las tuberías, las selecciones de las tuberías, los cálculos de energía, los cálculos de costos y las conclusiones que se desarrollaron para proporcionar una visión del mundo real basada en el diseño, la construcción y las experiencias operativas de los ingenieros que diseñan las tuberías.

8.2 Análisis de los factores que afectan la vida útil de las tuberías

La vida útil esperada de cada tipo de material de la tubería es importante en la evaluación del ciclo de vida, así como en los cálculos de los costos del ciclo de vida. Un estudio limitado solo podrá utilizar una vida útil prevista de 50 años y hacer que todas las tuberías tengan la misma duración si se asume que las tuberías serían reemplazadas debido a problemas de capacidad. Puede que no tenga en cuenta las cuestiones de toma de decisiones para la infraestructura sustentable que comprenden la fiabilidad, la durabilidad y la necesidad de mantener un nivel de servicio o rendimiento constante.

Otro componente de la determinación de la vida útil basada en el rendimiento es asignar un valor a los diversos materiales de las tuberías con el fin de compararlos, lo cual incluye ir más allá de las reclamaciones de comercialización de los fabricantes y revisar datos y fuentes adicionales para entender mejor el nivel de servicio que se espera de las tuberías.

La vida útil real de las tuberías que tienen menos de 100 años aumenta la energía incorporada en la fase cuna-a-puerta que incluye la fabricación de la tubería de reemplazo, así como energía adicional para el transporte y la instalación.

Debido a la naturaleza integral de este estudio y los requisitos de la norma de categoría del producto de las tuberías, la vida útil prevista que se utiliza es de 100 años. Esto se hizo con el fin de lograr un nuevo estándar de referencia para el análisis de la sustentabilidad y tener en cuenta los muchos riesgos que enfrenta el suministro de agua potable y la recolección de aguas residuales sanitarias y pluviales. Las tuberías pueden tener una vida útil que va desde los 15 años a más de 100 años.⁵⁴ La vida útil real de las tuberías que tienen menos de 100 años aumenta la energía incorporada en la fase cuna-a-puerta que incluye la fabricación de la tubería de reemplazo, así como la energía adicional para el transporte y la instalación. Los reemplazos de las tuberías durante la vida útil prevista de 100 años también aumentan en gran medida los costos globales del ciclo de vida debido a los pagos de la deuda del servicio para el diseño, costos adicionales por derechos de paso, venta de bonos y costos de construcción asociados con un proyecto adicional.

8.3 Selecciones de materiales para tuberías utilizados para comparaciones

Los siguientes productos se consideran selecciones de materiales para tuberías comparables utilizados por los servicios públicos en la planificación de la infraestructura nueva o de reemplazo de las tuberías. Consulte la Tabla 8.1 para ver los productos comparables para tuberías de presión y la Tabla 8.2 para ver productos comparables para tuberías por gravedad.

TABLA 8.1 : PRODUCTOS PARA TUBERÍAS DE PRESIÓN COMPARABLES

Medida del PVC y producto	Productos comparables	Estándar
PVC de 8" DR18 PC235 C900	PVC de 8" DR18	AWWA C900
	DI de 8" CL51	AWWA C151
	HDPE de 8" 4710 DR9	AWWA C906
PVC de 8" DR25 PC165 C900	PVC de 8" DR25	AWWA C900
	DI de 8" CL51	AWWA C151
	HDPE de 8" 4710 DR13.5	AWWA C906
PVC de 24" DR25 PC165 C905	PVC de 24" DR25	AWWA C905
	DI de 24" CL51	AWWA C151
	HDPE de 24" 4710 DR13.5	AWWA C906
	PCCP de 24" PC200	AWWA C301

Nota: Todas las tuberías de presión de hierro dúctil en este estudio están revestidas con cemento según la norma AWWA C104.

Como la gestión de la sustentabilidad está integrada con la gestión de activos a los costos financieros y ambientales más bajos, se puede determinar una nueva vida útil basada en el rendimiento.



TABLA 8.2 : PRODUCTOS PARA TUBERÍAS POR GRAVEDAD COMPARABLES

Medida del PVC y producto	Productos comparables	Estándar
PVC DE 8" PS46 F794 perfil de pared	PVC DE 8" PS46	ASTM F794
	DI de 8"	ASTM A746
PVC de 24" PS46 F794 perfil de pared	PVC de 24" PS46	ASTM F794
	PP de 24" PS46	ASTM F2736
	HDPE de 24" PS34	ASTM F2306
	PVC de 21" PS46	ASTM F794
PVC de 8" PS46 SDR35 D3034 pared sólida	PVC DE 8" PS46	ASTM D3034
	DI de 8"	ASTM A746
	VCP de 8"	ASTM C700
PVC de 24" PS46 F679 pared sólida	PVC de 24" PS46	ASTM F679
	DI de 24"	ASTM A746
	VCP de 24"	ASTM C700
	NRCP de 24"	ASTM C14
	PVC de 21" PS46	ASTM F679

Nota: Todas las tuberías de alcantarillado de hierro dúctil en este estudio están doblemente revestidas con cemento según la norma AWWA C104.

8.4 Vida útil de las tuberías subterráneas

La determinación de la vida útil de la infraestructura es un proceso importante en el desarrollo de las estrategias de gestión de mantenimiento aplicadas a diferentes activos. La determinación de la vida útil se basa en muchos factores, entre ellos: la evaluación del estado, las curvas de deterioro, los sistemas de gestión de mantenimiento (CMMS, por sus siglas en inglés), los antecedentes de trabajos centrados en Sistemas de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) o puntos de mucha actividad, los niveles de servicio y las normas de la industria validados, así como la experiencia regional y local. La vida útil es una consideración importante en el cálculo de los costos del ciclo de vida para demostrar la capacidad de gestionar activos con el menor costo de ciclo de vida. Estos costos están incluidos en las estrategias de reparación y reemplazo proyectados y en las proyecciones de financiación según se publican en un plan de gestión de activos.

Históricamente, el diseño del sistema de las tuberías se centró en la capacidad de la tubería. Una tubería fallaría en base al “final de la vida útil de la capacidad” o en un punto de falta de uso al “final de la vida física”. El “fin de la vida útil” podría estar relacionado con las fugas de agua o la pérdida de presión o algún otro requisito de cumplimiento evaluado o nivel de servicio a la comunidad definido. Los esfuerzos iniciales de gestión de activos de infraestructura solo se han centrado en extender el servicio.⁵⁵ Los requisitos de información financiera se centran solo en un “final de la vida financiera” cuando el activo está totalmente amortizado. Las prácticas de gestión de activos y tecnología han aumentado la capacidad de los servicios públicos para analizar mejor las relaciones entre los niveles de servicio, las medidas de rendimiento y los costos financieros de la gestión de activos.⁵⁶ Por lo tanto, “el fin de la vida económica” es cuando un activo deja de ser la alternativa de menor costo para satisfacer un nivel de rendimiento o servicio determinado.

Como la gestión de la sustentabilidad está integrada con la gestión de activos a los costos financieros y ambientales más bajos, se puede determinar una nueva vida útil.

Los ingenieros hidráulicos que se encargan del agua, las aguas residuales y el drenaje suelen pensar que el término “basado en el rendimiento” solo se aplica a la contratación, que se define como “un método de contratación orientado a los resultados que se centra en la producción, la calidad o los resultados ... para cumplir con las normas y requisitos específicos y medibles de rendimiento”.⁵⁷ El enfoque de diseño tradicional ha sido de naturaleza muy prescriptiva, lo que se ha traducido en una falta de comprensión de las consecuencias; esto significa que, en la etapa de diseño, hay una falta de comprensión del rendimiento de durabilidad práctica. Un enfoque de especificación basado en el rendimiento requeriría una evaluación cuidadosa y realista de la interrelación entre el diseño y la durabilidad, junto con los futuros costos de mantenimiento, reparación y operativos. La base conceptual de un enfoque basado en el rendimiento es asegurar que el rendimiento requerido se mantiene durante toda la vida útil prevista, junto con la optimización de los costos incurridos durante toda la vida útil.⁵⁸ En el caso de la infraestructura de las tuberías de agua subterránea y con el fin de determinar una vida útil para este estudio, los requisitos de rendimiento definidos por el usuario de los activos de las tuberías de agua incluyen:

- Proporcionar la prestación de servicios de agua durante un período de 100 años con un mínimo riesgo de degradar la calidad del agua.
- Proporcionar de manera constante una prestación de servicios de calidad del agua de alto nivel, de una manera rentable, sin aumentar significativamente el costo de las operaciones, el mantenimiento y la reparación durante un período de 100 años.

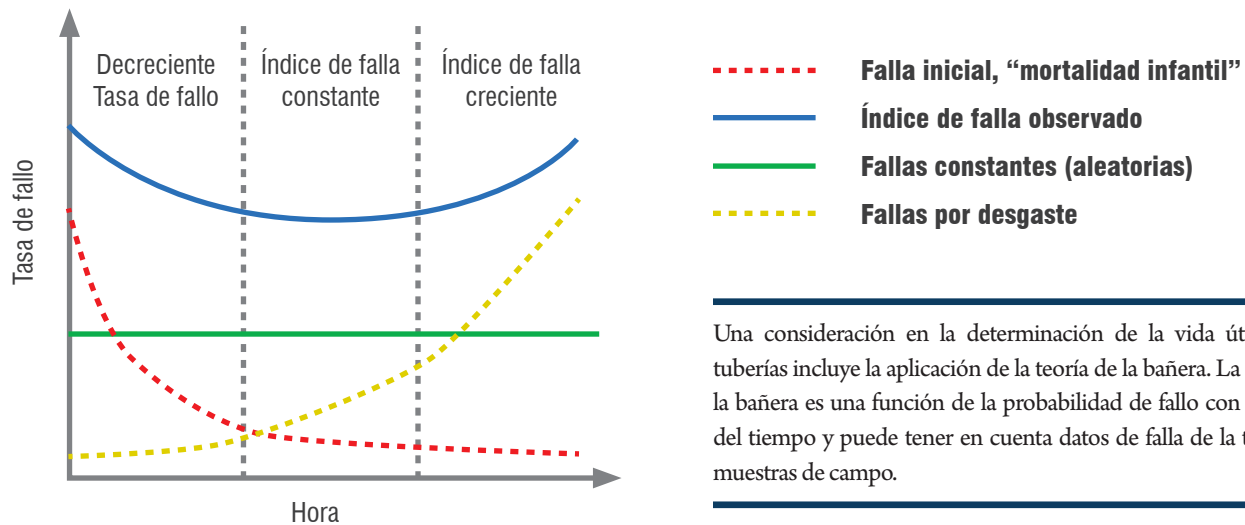
Un elemento clave de dicha vida útil se centra en los costos del requerimiento de energía y de la energía de bombeo asociados con las operaciones de un sistema de tuberías.

El costo total de posesión incluye el desembolso del capital inicial, los costos de mantenimiento y los costos de operación del sistema de tuberías. Se aplicó un análisis de costo del ciclo de vida para comparar diferentes alternativas de selección de tuberías. En este tipo de análisis comparable, la energía incorporada y otros impactos sociales y ambientales se pueden evaluar teniendo en cuenta la salud pública y los riesgos financieros. A medida que este proceso madura, la selección de tuberías basada en el rendimiento se puede añadir al proceso de contratación para asegurar que los contribuyentes del agua puedan beneficiarse de los requisitos definidos por el usuario.

Una consideración en la determinación de la vida útil de las tuberías incluye la aplicación de la teoría de la bañera. La curva de la bañera es una función de la probabilidad de falla con el tiempo y puede considerar datos de falla de la tubería y muestras de campo.⁵⁹ Esta teoría, que se ilustra en la Figura 8.1, reconoce que la tubería de agua puede no estar en perfecto estado cuando se coloca y se instala en el suelo. Algunos defectos y daños pueden haber tenido lugar durante la fabricación, el transporte y la instalación, lo que en última instancia reduce la calidad general del producto. Algunas de las causas del fracaso son un diseño inadecuado, falta de control de calidad y defectos de fabricación. El proceso de construcción también puede tener un efecto sobre el fallo de las tuberías. Los ejemplos incluyen la falla debido al tránsito, errores humanos y mala mano de obra. Los procesos de construcción o instalación descuidados o inadecuados también pueden reducir el rendimiento de las tuberías. Durante los años de servicio, la operación y el mantenimiento afectarán el rendimiento de las tuberías a través de diversas causas de fallo tales como fallas mecánicas, térmicas, químicas, biológicas, interferencias externas, catástrofes naturales y servicios y mantenimiento inapropiados.⁶⁰

Las mejores prácticas para extender la vida útil de los activos subterráneos incluyen: la corrección de los defectos de diseño del sistema de distribución; la reducción de los errores humanos y el uso de válvulas reductoras de presión, sistemas automatizados y una mejora en la formación. Estas mejoras del sistema son consideraciones importantes para todos los materiales de tuberías.

La vida útil es una consideración importante en el cálculo de los costos del ciclo de vida para demostrar la capacidad de gestionar activos con el menor costo de ciclo de vida.

FIGURA 8.1 : APLICAR LA TEORÍA DE “LA BAÑERA” PARA DETERMINAR LA VIDA ÚTIL DE LAS TUBERÍAS

Una consideración en la determinación de la vida útil de las tuberías incluye la aplicación de la teoría de la bañera. La curva de la bañera es una función de la probabilidad de fallo con el correr del tiempo y puede tener en cuenta datos de falla de la tubería y muestras de campo.

Otro componente de la determinación de la vida útil es asignar un valor a los diversos materiales de las tuberías con el fin de compararlos, lo cual incluye ir más allá de las reclamaciones de comercialización de los fabricantes y revisar las fuentes adicionales para entender mejor el nivel de servicio que se espera de las tuberías. La combinación de rendimiento y prestación de servicios son críticos con el fin de asignar un valor.⁶¹ Se toma en consideración cuando comienzan a romperse las tuberías principales de agua, surgen problemas de calidad del agua, o la degradación de la tubería (interna y/o externa) es una preocupación y necesita atención. En estas circunstancias, la tubería ha alcanzado efectivamente su vida útil como un activo gestionado de bajo costo y ahora el costo total de su ciclo de vida o el costo total de posesión comenzarán a aumentar drásticamente.

8.4.1 Vida útil de cada material de las tuberías

A los efectos de este modelo de 100 años y la evaluación de la infraestructura hídrica subterránea sustentable, se han asignado las siguientes vidas útiles de las tuberías como se muestra en la Tabla 8.3.

Consideraciones generales para la asignación de vidas útiles de las tuberías:

- ▶ Antecedentes de fallas/datos de reemplazo
- ▶ Condiciones medias del suelo en los EE. UU.
- ▶ Espesor de la tubería
- ▶ Índices de corrosión
- ▶ Fragilidad
- ▶ Pérdida de agua e infiltración

TABLA 8.3: PRESUNCIONES DE VIDA ÚTIL DE LAS TUBERÍAS SELECCIONADAS PARA COMPARACIÓN

Vida útil de las tuberías previa a la sustitución para LCA		
Material de la tubería	Estándar	Vida útil (años)
PVC	AWWA C900	100
PVC	AWWA C905	100
PVC	ASTM D3034	100
PVC	ASTM F679	100
PVC	ASTM F794	100
DI	AWWA C151	50
DI	AWWA A746	50
HDPE	AWWA C906	50
HDPE	ASTM F2306	50
PCCP	AWWA C301	75
PP	ASTM F2736	50
VCP	ASTM C700	50
NRCP	ASTM C14	50

Consulte la Sección 9 para ver una discusión detallada sobre la vida útil asignada.

8.4.2 Vida útil de 100 años para las tuberías de PVC

El PVC tiene una vida útil de más de 100 años para las aplicaciones de agua, aguas residuales y aguas pluviales, ya que no lo afecta la corrosión. El PVC tiene más de 60 años de rendimiento exitoso en tuberías en servicio. *Informe de longevidad de las tuberías de PVC de mayo de 2014: La asequibilidad y el estándar de referencia de 100 años* del Dr. S. Folkman examinaron la vida útil de las tuberías de PVC para agua y aguas residuales.⁶² Las conclusiones de este estudio fueron que la combinación de la investigación, las excavaciones de campo, las pruebas y el análisis confirmaron un estándar de referencia de 100 años para las tuberías de PVC. En Europa, las excavaciones y las pruebas después de 70 años de uso confirman que las tuberías de PVC tendrán una duración de más de 170 años.⁶³ Según el artículo, *Predicción de la vida residual de las tuberías de desagüe de PVC* por A. J. Whittle y J. Tennakoon, un estudio basado en la prueba de las tuberías de alcantarillado de PVC exhumadas, se indica que la expectativa de vida adicional para las tuberías de alcantarillado de PVC estudiadas es de un mínimo de unos 100 años y un “mejor valor” de casi 300 años.⁶⁴ Las tuberías de desagüe de PVC que también fueron excavadas y probadas en Europa tuvieron resultados similares.⁶⁵ *Un examen de los métodos innovadores utilizados en la inspección de los sistemas de aguas residuales*, publicado por la Fundación de recuperación y medio acuático (WERF, por sus siglas en inglés) declaró: “Si una empresa de servicios públicos tiene principalmente tuberías de PVC, no tendría sentido invertir en un sistema de inspección diseñado para medir la cantidad de pérdida de pared debido a la corrosión.”⁶⁶ Asimismo, cuando se utilice el costo unitario completo de una tubería metálica, el precio total aumentaría tanto para el costo de capital como para los gastos de operación y mantenimiento, cuando se agreguen los costos del programa de control de la corrosión. La selección de las tuberías impulsará el costo hacia arriba o hacia abajo para la comunidad local.⁶⁷

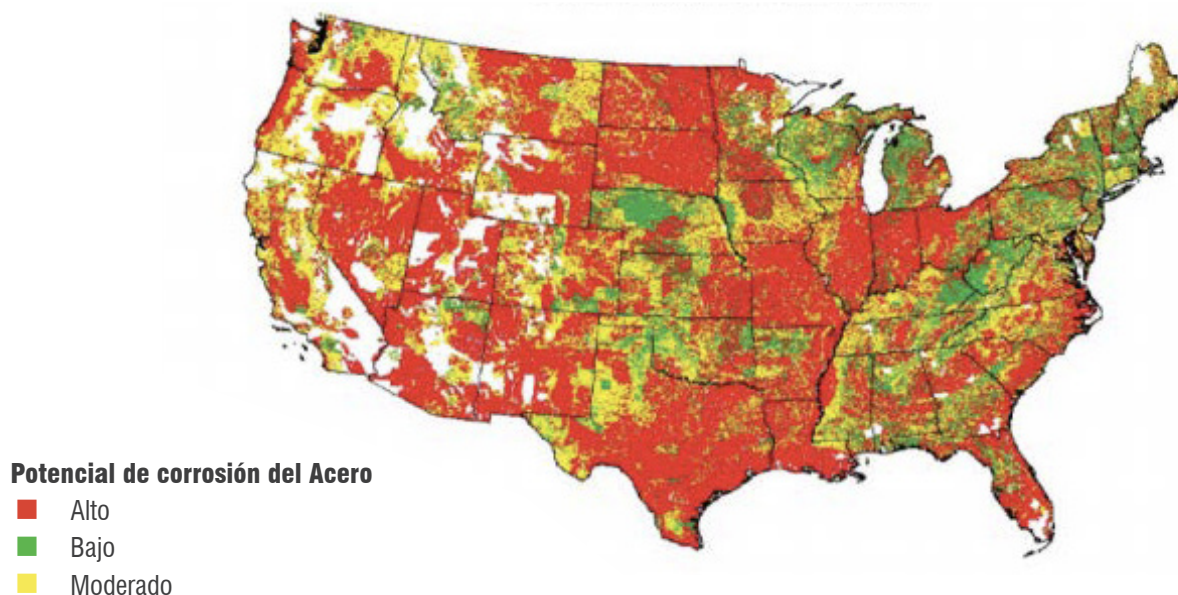
8.5 Factores que influyen en la vida útil de las tuberías de agua

Hay muchos factores que influyen en la vida real de la infraestructura hídrica subterránea. La corrosión, en sus diversas formas, es la causa principal de las fallas de las tuberías en América del Norte, creando una serie de problemas relacionados que impactan en la prestación de servicios y la calidad del agua. Otros factores incluyen las fallas inducidas por la oxidación causada por los productos de desinfección usados en los sistemas de agua, la infiltración excesiva o la exfiltración debido a la corrosión o a fugas en las juntas y la pérdida de capacidad de flujo o mayores costos de bombeo debido al aumento de la fricción en la tubería o a la acumulación de biosólidos/tuberculaciones en el interior de la tubería.

8.5.1 Corrosión externa

La corrosión es el mayor riesgo y la causa de rotura de la tubería principal de agua y los fallos de las tuberías en los EE. UU. y debe tenerse en cuenta en el diseño de los sistemas de las tuberías. Siempre existirá el riesgo de varios tipos de corrosión (el cambio climático no hará sino exacerbar este problema) y siempre deberán ser supervisadas. La corrosión de las tuberías de hierro afectará negativamente la calidad del agua.⁶⁸ Según *los índices de la rotura de las tuberías principales de agua en los EE. UU. y Canadá: Un amplio estudio* del Dr. S. Folkman indica que el 75 % de todos los servicios públicos tienen condiciones de suelo corrosivas.⁶⁹ El mapa de la Figura 8.2 muestra el potencial de corrosión en los Estados Unidos.

FIGURA 8.2 : MAPA DE LOS SUELOS CORROSIVOS DE EE. UU. (POTENCIAL DE CORROSIÓN DEL ACERO DE CONUS)



Las fugas de la infraestructura hídrica resultan en aproximadamente 2,2 billones de galones de agua perdida cada año.⁷⁰ La mayor parte de esta pérdida se debe a tuberías corroídas y rotas. La corrosión y las fugas aumentan la energía de bombeo, pueden causar el crecimiento de bacterias y otros organismos, y pueden resultar en la lixiviación de metales en el suministro de agua. Los estudios estiman que las tuberías de PVC tienen una esperanza de vida de más de 100 años.⁷¹ Una razón para esta longevidad es que las tuberías de PVC son resistentes a la corrosión interna y externa. En los suelos de pH alto, las tuberías de metal son propensas a corroerse y fallar mucho antes de la expectativa de vida publicada por los fabricantes.

Es más probable que el hierro dúctil falle en un período de entre 21 y 40 años. Los hoyos o agujeros de la corrosión se identificaron como la mayor causa de fallas del material de las tuberías de hierro dúctil. La vida útil de la tubería de hierro dúctil corresponde a los impactos de la baja a moderada corrosión del suelo en la tubería sin protección. Del mismo modo, las tuberías de presión de concreto también fallan con mayor frecuencia entre los 21 y los 40 años, lo que indica que los suelos corrosivos también influyen en la vida útil del concreto. Según B. Cohen en *Refacción de la infraestructura de agua subterránea en ruinas de Estados Unidos*, se esperaba que las primeras tuberías de hierro dúctil de paredes más gruesas duren entre 50 y 75 años.⁷² Sin embargo, un estudio de una empresa de servicios públicos en Wisconsin muestra que el 79 % de las tuberías de DI instaladas entre 1953 y 1982 solo duraron entre 25 y 50 años.⁷³ La Oficina de Reclamación de EE. UU. le pidió al Consejo Nacional de Investigación (NRC, por sus siglas en inglés) que evalúe la fiabilidad de las tuberías de hierro dúctil con revestimiento de polietileno y protección catódica para una vida útil de 50 años. La NRC concluyó: “el comité no considera que los estudios de DIPRA confirman que las tuberías de DI con PE pueden satisfacer la fiabilidad prevista de más de 50 años de vida útil”.⁷⁴

En suelos donde existe un potencial de corrosión, las tuberías de metal como el hierro dúctil necesitarán reemplazo frecuente. Según un estudio de 2011 realizado por la Fundación de Investigación del Agua AWWA, las tuberías de hierro dúctil con paredes más delgadas (que representan la mayoría de las tuberías metálicas vendidas) en suelos moderadamente corrosivos tienen una expectativa de vida de tan solo 11 a 14 años.⁷⁵ Si se utilizan los mismos materiales de tubería propensos a la corrosión en suelos y lugares de alto riesgo, y la tubería se reemplaza cada 15 años, en el transcurso de 100 años se debería reemplazar la tubería hasta 7 veces. Esto aumenta los impactos ambientales incorporados y los costos del sistema conmensurablemente por hasta 7 veces.

La corrosión, en sus diversas formas, es la causa principal de las fallas de las tuberías en América del Norte, creando una serie de problemas relacionados que impactan en la prestación de servicios y la calidad del agua.

8.5.2 Corrosión interna

Corrosión de las fuentes de aguas residuales

La corrosión no solo se produce desde el entorno exterior de las tuberías, sino que también se puede producir internamente en los sistemas de drenaje y las aguas residuales u otros fluidos o gases en el interior de la tubería. Por ejemplo, los sistemas de drenaje y aguas residuales “...contienen niveles significativos de materiales biológicos y orgánicos, incluidas muchas bacterias que permanecen activas en las corrientes de aguas residuales. Desde el punto de vista de la corrosión, los tipos más importantes de bacterias son las que metabolizan los compuestos de azufre debido a que esta actividad microbiológica puede producir productos químicos ácidos que son corrosivos para el concreto y el acero o el hierro. Algunas bacterias también oxidan los iones ferrosos a iones férricos, lo que hace que el medio ambiente local se vuelva más corrosivo para el acero al carbono”.⁷⁶

La forma más común en la que estos microorganismos afectan las corrientes de aguas residuales es por el crecimiento de colonias, que crean un entorno local que es lo suficientemente ácido como para disolver el concreto y corroer el acero y el hierro dúctil. Otro problema comercial importante, debido a la acción de *Thiobacillus ferrooxidans* en particular, es la formación de montículos de oxihidróxido férrico altamente insoluble que pueden obstruir las tuberías de acero o de hierro. También se forma sulfuro de hidrógeno gaseoso (H_2S), el familiar olor a “huevo podrido”, que acidifica la humedad de la superficie en espacios libres de las estructuras cerradas o cubiertas, causando la corrosión ácida de las superficies de concreto o metal. H_2S y el oxígeno se combinan para formar ácido politiónico, una forma débil de ácido sulfúrico.

La industria de aguas residuales toma la corrosión y los problemas de salud pública muy en serio. En 2010 y 2012 se llevó a cabo una encuesta independiente de la industria sobre materiales de recolección de aguas residuales que proporciona los más altos beneficios públicos una vez en servicio y se publicó en la *Guía de materiales de tuberías para tecnologías sin zanjas (la Guía)*.⁷⁷ La industria de las aguas residuales respondió que la longevidad y la vida útil eran los factores más importantes en la elección de las tuberías. Los ingenieros de aguas residuales consideran que las tuberías no solo son un medio de transporte, sino también una importante barrera de la salud pública a una posible contaminación. Debido a las condiciones corrosivas y cáusticas internas, la *Guía* clasificó al PVC como las tuberías más comúnmente utilizadas que alcanzan la vida útil más larga sobre todos los otros materiales de tubería, como ladrillo, arcilla, concreto, fibra de vidrio, concreto polímero, polietileno, hierro fundido, hierro dúctil y acero. El PVC ha existido durante décadas, y sus características de materiales no corrosivos han hecho que sea ampliamente aceptado en la industria de las aguas residuales.⁷⁸

Corrosión de la fuente de agua

El pH excesivamente alto o bajo puede ser perjudicial para los sistemas de agua. El pH alto hace que se incrusten con depósitos las tuberías de agua y los aparatos que usan agua, lo que reduce la eficacia de la desinfección de cloro, causando así la necesidad de cloro adicional. El agua de bajo pH corroerá o disolverá los metales y otras sustancias.⁷⁹ En general, el agua con un pH < 7 se considera ácida y un pH > 7 se considera básica. La EPA recomienda que los sistemas públicos de agua mantengan los niveles de pH entre 6.5 y 8.5. “Los iones de cloruro negativos son corrosivos, así que cuando el agua de alto contenido de cloruro se bombea a través de las tuberías de plomo (o tuberías de hierro y cobre unidas con soldadura de plomo), el plomo se filtra en el agua.”⁸⁰ Las redes de las tuberías requieren pruebas constantes de la calidad del agua debido a los cambios en la temperatura, la degradación de los componentes de cemento y metal en los materiales de las tuberías, las roturas de las tuberías, los productos químicos de control de la corrosión y los aditivos desinfectantes.

Las fugas de la infraestructura hídrica resultan en aproximadamente 2,2 billones de galones de agua perdida cada año. La mayor parte de esta pérdida se debe a tuberías corroídas y rotas.

8.6 Riesgo de corrosión y calidad del agua

A medida que la infraestructura de las tuberías de agua subterránea se extiende más allá de las expectativas de vida de servicio práctico, los servicios públicos deben evaluar los riesgos conocidos, como el plomo en las juntas de las tuberías de hierro, las roturas de las tuberías principales de agua, los avisos de contaminación del agua, la contaminación del agua potable, los errores en el tratamiento de la corrosión, el agua oxidada que crea riesgos para la salud pública, los daños a la propiedad privada, el aumento de los costos de mantenimiento, la pérdida de agua, el aumento de las facturas de agua y los problemas, políticamente difíciles, de desconfianza de la población. Estos son factores conocidos y la celebración de las prácticas comerciales tradicionales seguirá molestando a la industria del agua, ofreciendo los mismos resultados donde la corrosión es un riesgo para el material de la tubería y la calidad del agua potable. El cambio climático y otras tendencias continuarán afectando a los materiales de las tuberías propensos a la corrosión. Los siguientes hallazgos y las pruebas presentadas en este estudio pueden ayudar a los administradores de servicios públicos a involucrarse en discusiones más informativas para mejorar las expectativas de los clientes y con los funcionarios públicos en lo que respecta a la planificación y al desarrollo de la política de infraestructura sustentable y calidad del agua.

8.6.1 La corrosión de las tuberías de hierro fundido con juntas de plomo: Un problema para la calidad del agua y la salud pública

Históricamente, se han utilizado varios tipos de materiales de tuberías y juntas en la industria del agua de los Estados Unidos. “Los materiales utilizados para hacer y unir la tubería del sistema de distribución han mejorado.”⁸¹ Como se ve en la Figura 8.3, el plomo era el material predominante en las juntas de las tuberías para la mayoría de las clases de tuberías de hierro fundido y presenta un riesgo significativo en la calidad del agua en la actualidad. El plomo se utilizó como material para juntas de tuberías de hierro fundido hasta la década de 1980. La corrosión en los sistemas de las tuberías metálicas de agua potable continuará siendo un factor de riesgo para la salud pública. Según un informe de la Conferencia de Alcaldes de EE. UU., las tuberías principales de agua de hierro con junta de plomo son una de las posibles fuentes de contaminación por plomo en el suministro de agua potable de Flint, Michigan.⁸²

Otras discusiones sobre la corrosión de las tuberías de hierro y los problemas de calidad del agua se pueden encontrar en el Apéndice.

8.7 Corrosión interna y pérdida de energía

8.7.1 Diámetros internos de las tuberías

El diámetro interno de las tuberías es crítico en la determinación de las características hidráulicas de las tuberías de presión y de gravedad. Para las tuberías seleccionadas usadas en los análisis de este estudio, los diámetros internos se determinaron utilizando las normas de las tuberías, las tolerancias dimensionales permitidas en las normas, el espesor del revestimiento estándar y la bibliografía de los fabricantes.

8.7.2 Factores de fricción de las tuberías

Los factores de fricción de las tuberías se basan en una búsqueda bibliográfica y recopilación de datos de 55 fuentes. Por ejemplo, un análisis reciente de la ciudad de Detroit muestra que la eficiencia de bombeo para las tuberías de hierro dúctil disminuye continuamente con la edad y no permanece en las especificaciones de fábrica.⁸³ La Autoridad del Agua de Virginia Occidental (WVWA, por sus siglas en inglés) llegó a conclusiones similares en su análisis de la tubería de agua de hierro dúctil.⁸⁴ Teniendo en cuenta la compilación y la revisión, los valores para los factores C de Hazen-Williams utilizados para tuberías de presión y para los factores de fricción n de Manning utilizados para tuberías de gravedad se resumen en la Tabla 8.4. La investigación reveló documentación para los índices de deterioro de los factores de fricción, en particular para el factor de Hazen-Williams C utilizado para tuberías de presión. Estos índices de deterioro con el tiempo se incorporaron en los cálculos de energía hidráulica para los diversos tipos de materiales de las tuberías.⁸⁵

FIGURA 8.3 : CRONOLOGÍA DE LA TECNOLOGÍA DE TUBERÍAS EN EE. UU. EN EL SIGLO XX

Material de la tubería	Tipo de junta	Protección interna contra la corrosión	Protección externa contra la corrosión	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010
Acero	soldada	Ninguna	Ninguna	■	■	■	■	■	■						
Acero	Soldadas	Cemento	Ninguna					■	■	■	■	■	■	■	■
Hierro fundido bruto	Plomo	Ninguna	Ninguna	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Hierro fundido centrifugado	Plomo	Ninguna	Ninguna			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Hierro fundido centrifugado	Plomo	Cemento	Ninguna			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Hierro fundido centrifugado	Leadite	Ninguna	Ninguna			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Hierro fundido centrifugado	Leadite	Cemento	Ninguna			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Hierro fundido centrifugado	Caucho	Cemento	Ninguna						■	■	■	■	■	■	■
Hierro dúctil	Caucho	Cemento	Ninguna							■	■	■	■	■	■
Hierro dúctil	Caucho	Cemento	PE							■	■	■	■	■	■
Fibrocemento	Caucho	Ninguna	Ninguna				■	■	■	■	■	■	■	■	■
Concreto reforzado	Caucho	Ninguna	Ninguna	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Concreto pretensado	Caucho	Ninguna	Ninguna					■	■	■	■	■	■	■	■
PVC	Caucho	Ninguna	Ninguna						■	■	■	■	■	■	■

■ Disponibilidad del material de la tubería

■ Períodos de disponibilidad de material y uso

■ Períodos prolongados de lixiviación potencial de las juntas de plomo en tuberías de hierro

Gráfico adaptado a partir de fuentes de la EPA⁸⁶**TABLA 8.4 : FACTORES DE FRICCIÓN DE LAS TUBERÍAS UTILIZADOS**

Material de la tubería	Normas	Hazen-Williams C	n de Manning
PVC	C900, C905, F794, D3034, F679	155 - 150	0,009
DI	C151, C104, A746	≤ 140	0,013
HDPE	C906, F2306	155 - 150	0,012
PP	F2736	N/C	0,012
PCCP/NRCP	C301, C14	≤ 140	0,013
VCP	C700	N/C	0,013

Los diseñadores de estaciones de bombeo, tuberías de transmisión de agua y sistemas de distribución de agua utilizan un factor de fricción, normalmente Hazen-Williams C, que es representativo de la edad ponderada para el sistema que están diseñando. Para demostrar los impactos ambientales causados por la formación de rugosidad en la superficie de las tuberías, se realizaron análisis de la muestra utilizando los índices de degradación aceptados del coeficiente de Hazen-Williams para diferentes materiales de las tuberías. Los coeficientes variaron para la degradación en el tiempo de sus nuevos valores al valor de degradación más bajo. La Tabla 8.5 enumera las comparaciones entre los coeficientes de Hazen-Williams para tuberías recién instaladas, los puntos de datos de la vida útil de 50 años y de la vida útil de 100 años. La Tabla 8.5 enumera también la pérdida de energía resultante para cada uno de esos hitos que se suma al costo global y los impactos ambientales del sistema. La Figura 8.4 muestra gráficamente los efectos de la mayor pérdida de fricción en el tiempo sobre la energía de bombeo. La Figura 8.4 asume una vida útil de más de 100 años para el PVC, una vida útil de 75 años para el PCCP, una vida útil de 50 años para la tubería de presión de HDPE y una vida útil de 50 años para el hierro dúctil.

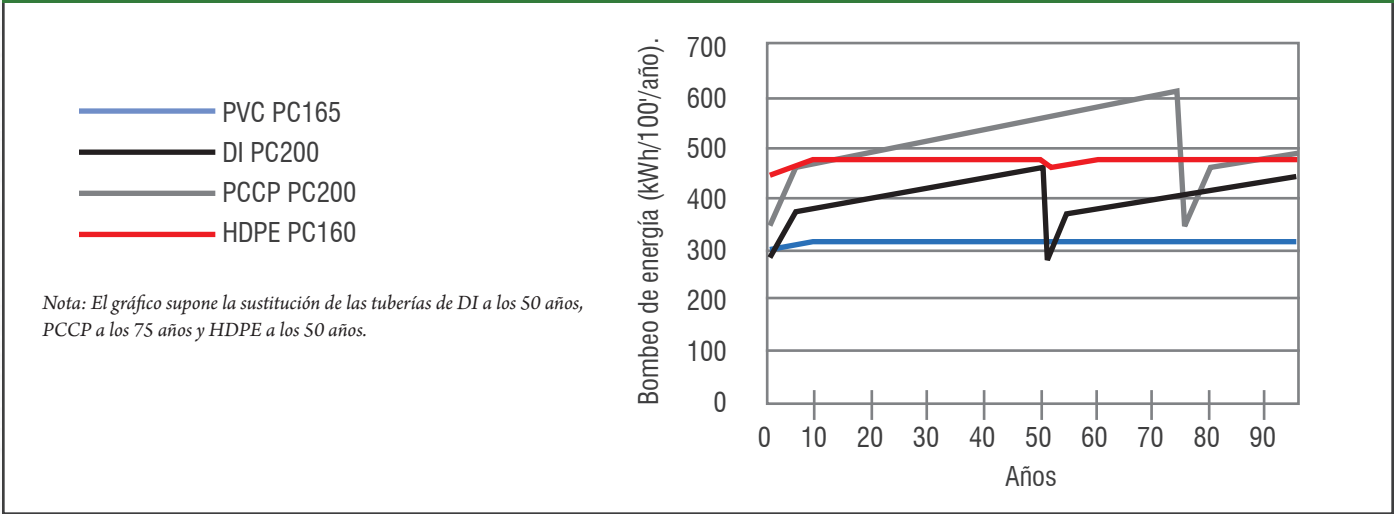
A lo largo de la vida útil, la superficie de la tubería puede ponerse rugosa, esto causa más pérdida de energía por fricción que las bombas deben superar para el transporte de agua potable. No todos los materiales de las tuberías se ponen rugosos al mismo grado con el correr del tiempo. Las tuberías de PVC no se corroen ni se ponen rugosas, manteniendo así las propiedades hidráulicas del sistema de agua cerca de las especificaciones originales de diseño de la instalación.

La corrosión afecta la eficiencia de bombeo y los costos de operación. Los estudios han documentado que la eficiencia de bombeo disminuye continuamente con la edad a medida que la tubería se corroe.

TABLA 8.5 : EFECTOS DEL DETERIORO DEL FACTOR DE FRICCIÓN POR PÉRDIDA DE CARGA PARA UNA TUBERÍA DE AGUA POTABLE DE 8", ASUMIENDO UN FLUJO CONSTANTE

	Coeficientes de Hazen-Williams			Pérdida de energía por fricción (kWh/100'/año).		
Hito del ciclo de vida	PVC (DR25)	HDPE (DR13.5)	DI revestida en cemento (350 psi)	PVC (DR25)	HDPE (DR13.5)	DI revestida en cemento (350 psi)
Instalar	155	155	140	125	185	140
50 años	150	150	110	130	195	225
100 años	150	150	95	130	195	280

FIGURA 8.4: COMPARACIÓN DE BOMBEO ANUAL DE ENERGÍA PARA TUBERÍAS DE 24"

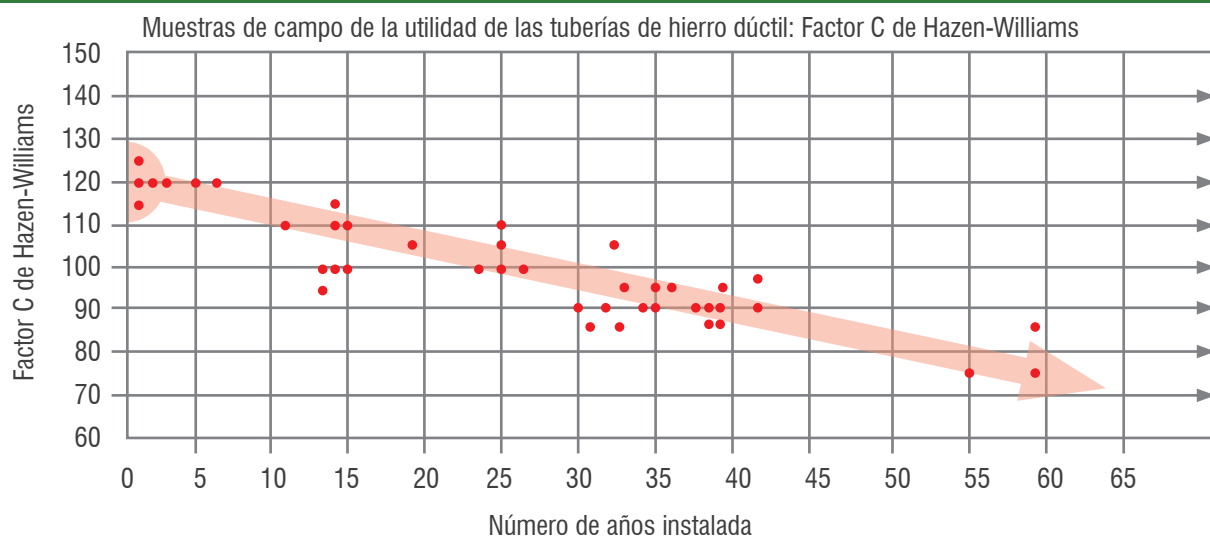


Debido a que las tuberías de PVC no se corroen a medida que envejecen, la uniformidad de la superficie de la pared interior de las tuberías no disminuye. Las tuberías de PVC tienen una superficie lisa que reduce la pérdida de energía por fricción sobre la vida útil de la tubería en comparación con las tuberías metálicas o de concreto. El coeficiente de Hazen-Williams (factor C) para las nuevas tuberías de PVC es 155-165 (cuanto mayor sea el valor, más lisa la tubería).⁸⁷ Un coeficiente de flujo de $C = 150$ se utiliza generalmente como un valor conservador para el diseño de sistemas de tuberías de PVC.^{88 89 90} En contraste, las nuevas tuberías de hierro dúctil revestidas con mortero pueden tener un factor C de 140 según lo declara la Asociación de investigación de tuberías de hierro dúctil (DIPRA, por sus siglas en inglés). Sin embargo, debido a la corrosión y el deterioro del material de revestimiento, las paredes internas de las tuberías de hierro se vuelven significativamente rugosas con el correr del tiempo, disminuyendo el factor C.⁹¹ Para evitar la corrosión y proporcionar una pared de la tubería que esté protegida para el contacto con agua potable, se añade revestimiento de cemento a las tuberías de hierro dúctil para agua. Los factores C de las tuberías de concreto y las tuberías metálicas revestidas en mortero suelen oscilar entre 120-140 para la tubería nueva y 75-100 para las tuberías más viejas, ya que se

Las tuberías de PVC no se corroen ni se ponen rugosas, manteniendo así las propiedades hidráulicas del sistema de agua cerca de las especificaciones originales de diseño de la instalación.

degradan con el tiempo.⁹² Muestras de campo de más de 60 tuberías de hierro dúctil revestidas con mortero de la WVWA demuestran cómo el factor C disminuye de 125 a 75 durante un período de tiempo de 55 años. La Comisión Sanitaria Suburbana de Washington (WSSC, por sus siglas en inglés), que es la octava mayor empresa de servicios de agua y aguas residuales en los EE. UU. y proporciona agua potable a 1,8 millones de personas, proporcionó 27 muestras de campo de tuberías que muestran una tendencia similar. Vea la Figura 8.5.⁹³ La HDPE tampoco está sujeta a la corrosión interna y tiene una pared interna lisa. Se utiliza generalmente un factor C de 150 para las tuberías de presión de HDPE.

FIGURA 8.5 : MUESTRAS DE CAMPO QUE INDICAN UN FACTOR C DECRECIENTE PARA LAS TUBERÍAS DE DI



ATRIBUTOS AMBIENTALES Y DE RENDIMIENTO DE LOS MATERIALES DE CONDUCCIÓN ALTERNATIVOS

Mientras que la capacidad de entender los impactos ambientales de los productos de las tuberías de PVC es valiosa en sí misma, un poco de perspectiva también puede ser adquirida al ver cómo los resultados del estudio de LCA se comparan con otros estudios de LCA y rendimiento de las tuberías publicados.^{94 95} Todos estos estudios fueron realizados por distintos profesionales con consideraciones metodológicas potencialmente diferentes. Se revisaron los estudios de LCA y de rendimiento para mantener la coherencia en sus conclusiones. En esta sección se presentan los resultados de estos estudios publicados y ampliamente disponibles. Estos estudios pueden variar entre límites y presunciones del sistema.

9.1 Tuberías de hierro dúctil (DI)

Las tuberías de hierro dúctil han sido un material ampliamente utilizado en los sistemas de tuberías de agua en los EE. UU. y Canadá. Sin embargo, de acuerdo con un informe de la Unión Nacional de Contribuyentes, la longevidad de las tuberías de hierro dúctil ha caído en picada debido a sus paredes más delgadas y a la mayor susceptibilidad a la corrosión en comparación con las tuberías de hierro más viejas.⁹⁶ Las tuberías de hierro dúctil rara vez se utilizan en la actualidad en Canadá y la tendencia a la baja en su uso en los EE. UU. es bien conocida.

9.1.1 Vida útil de las tuberías de hierro dúctil (DI)

Con el tiempo, las tuberías de hierro dúctil se han hecho con paredes progresivamente más finas, por lo que la corrosión es un riesgo importante que siempre existirá.⁹⁷ Los estudios han demostrado la falla de los revestimientos de mortero y cemento (estructural y lixiviación química) en un período de entre 10 y 30 años. Estas fallas tienen un impacto en la vida útil esperada.^{98 99} El mayor uso de materiales reciclados puede hacer que la corrosión se acelere a causa de material de calidad inferior que puede estar presente en la chatarra de hierro reciclado. Todos los factores que conducen al deterioro de la tubería de hierro dúctil pueden reducir su vida útil a menos de 50 años.¹⁰⁰

Inicialmente, el hierro dúctil se anunciaba como poseedor de una resistencia a la corrosión superior a la del hierro de fundición gris. Esta idea ganó aceptación en el mercado y permitió que las tuberías de hierro dúctil de paredes más finas reemplazaran a las tuberías de hierro

fundido de pared más gruesa. Sin embargo, la investigación proporciona evidencia de corrosión consistente entre los tipos de tuberías de hierro:

- La investigación realizada por la Oficina Nacional de Normas (ahora el Instituto Nacional de Normas y Tecnología) indicó hace décadas que el hierro dúctil, el hierro fundido y el acero se corroen a tasas similares en suelos de baja resistividad.¹⁰¹
- El ensayo de la Oficina Nacional de Normas concluyó en un artículo de 1976, que el hierro dúctil y el acero “enterrados en los mismos suelos... se corroen a casi la misma velocidad”¹⁰²
- La Asociación de investigación de tuberías de hierro dúctil (DIPRA, por sus siglas en inglés) reconoce que, a efectos prácticos, el hierro dúctil y el hierro fundido se pueden considerar que se corroen a la misma velocidad.¹⁰³ Sin embargo, la DIPRA no se ha ajustado a la expectativa del mercado teniendo en cuenta una reducción del 76 % en el espesor de la pared de la tubería.

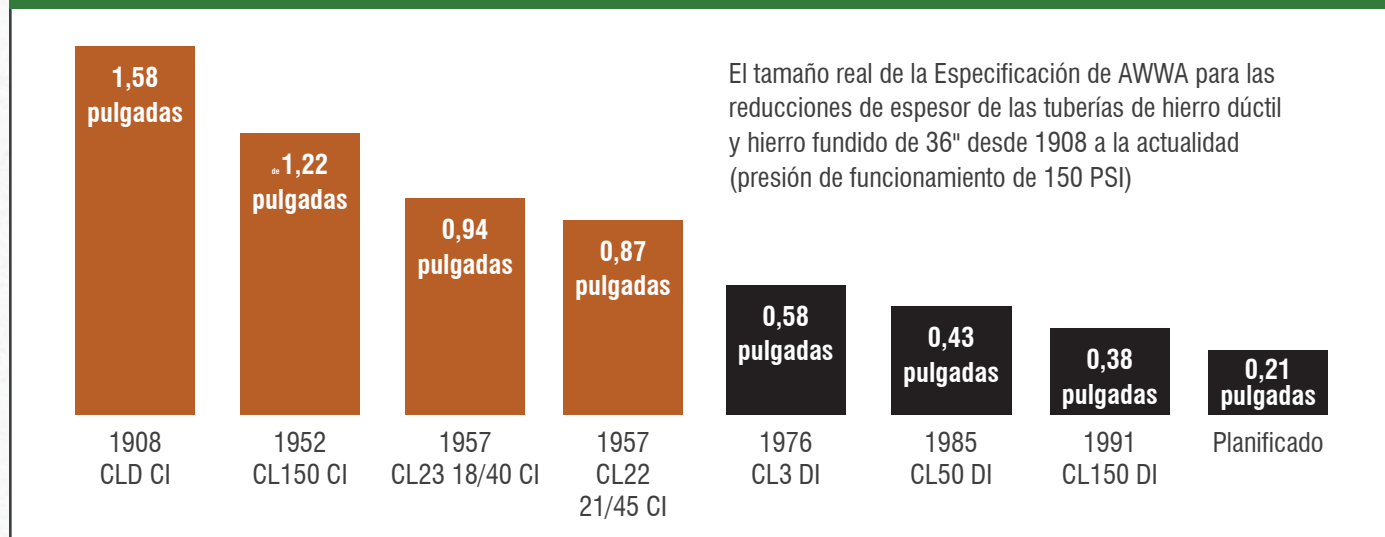
La pared más delgada de las tuberías de hierro dúctil es el principal factor que contribuye a su vida útil más corta en comparación con el hierro fundido y el aumento de las fallas de las principales tuberías de agua relacionadas con la corrosión.¹⁰⁴ Históricamente, el espesor extra de la tubería de hierro fundido proporcionó más metal para que la corrosión ataque (es decir, un sobreespesor de corrosión). Como se muestra en la figura 9.1, la diferencia de espesor de pared histórica puede ser tanto como un 76 % más delgada para una tubería de clase de presión y diámetro similar.¹⁰⁵ Si el espesor de pared de las tuberías de hierro dúctil es solo una quinta parte del espesor de pared de las de hierro fundido y la velocidad de corrosión es la misma, entonces su vida útil esperada será sustancialmente menor que para el hierro fundido en ambientes similares. Las paredes de las tuberías de hierro se redujeron de 1,58 pulgadas en 1908 a 0,38 pulgadas en 1991. Las nuevas reducciones propuestas afinarían la pared de las tuberías a 0,21 pulgadas. La diferencia en el espesor de pared es una consideración que debe tenerse en cuenta durante las evaluaciones de la corrosión y la selección de los métodos de control. Algunas empresas de servicio están especificando clases de hierro dúctil con un mayor espesor para una pared de espesor adicional (que resultan en mayores costos de energía incorporada y de capital) en un intento de proporcionar un sobreespesor de corrosión mayor. El simple hecho es que las tuberías metálicas más delgadas, en condiciones similares de suelo y humedad, se corroen y fallan más rápidamente que sus predecesoras de hierro fundido más gruesas.¹⁰⁶ Las tuberías de hierro fundido gruesas demoraron más en corroerse a través de la pared de las tuberías que las tuberías actuales de hierro dúctil (DI) con paredes más delgadas.¹⁰⁷ Sin embargo, durante la mayor parte de las veces estas tuberías más antiguas tuvieron un bajo rendimiento

hidráulico. También estaban causando problemas de calidad del agua y requirieron un mantenimiento caro.

“La corrosión es la causa principal de la falla de las tuberías de hierro dúctil, seguida de fallas por rotura transversal y por lo tanto la falla de la junta.”¹⁰⁸ Como se dijo anteriormente, el 75 % de las empresas de servicios públicos en los Estados Unidos tienen condiciones del suelo corrosivas. La velocidad de corrosión a través del espesor de la pared de la tubería resulta en una vida útil de menos de 50 años para las tuberías de hierro dúctil.^{109 110} Los suelos arcillosos tienden a tener índices de corrosión mucho mayores que otros tipos de suelo.¹¹¹ Con la dimensión de pared estándar de tan solo 0,25 pulgadas, una tasa de corrosión moderada puede generar hoyos con profundidades que penetran las paredes de la tubería dúctil en menos de una década. El uso excesivo o incorrecto de protección catódica puede corroer las tuberías de hierro dúctil. La aceptación del recubrimiento de polietileno como un método de control de la corrosión viable es todavía un tema controvertido en la comunidad del control de la corrosión. Las reclamaciones de los fabricantes de las tuberías, los proveedores de revestimiento y las empresas de protección catódica a menudo se inclinan por sus intereses creados en la venta de sus productos.¹¹² Muchos ingenieros de corrosión consideran el polywrap como un medio ineficaz de protección contra la corrosión en tuberías de DI.¹¹³ Incluso con el recubrimiento de polietileno (que no está

aprobado por la Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión como un método de control de la corrosión)¹¹⁴ y con el uso de las tuberías de la clase más gruesa para lograr una profundidad adicional en la pared de tubería de sacrificio, la tubería de hierro dúctil puede tener una vida útil de menos de 50 años debido a los suelos corrosivos. Otros factores que afectan la vida útil de la tubería de hierro dúctil incluyen el deterioro del revestimiento de cemento y la corrosión interna. Estos factores reducen la capacidad de la tubería para satisfacer las demandas del cliente. Por otra parte, solo el revestimiento de las tuberías de hierro dúctil revestido de mortero de cemento está certificado con la norma 61 de NSF/ANSI de Efectos sobre la salud de los componentes del sistema de agua potable. El interior de la pared de la tubería de hierro dúctil no está certificado para NSF/ANSI 61. Cuando el revestimiento de mortero de cemento se degrada durante el uso o se rompe durante el golpeo, la instalación, el transporte o la manipulación inadecuada, el agua potable puede entrar en contacto con el material de hierro, lo que plantea un riesgo potencial para la salud pública. Además, la zona de la campana de la tubería de DI representa un riesgo para la salud pública, ya que el agua potable se expone a una superficie no certificada a medida que pasa a través de esta porción de la tubería. El costo de capital de la instalación de una nueva tubería de PVC puede ser casi un 23 % menos caro que la limpieza y el re-revestimiento de las tuberías de hierro dúctil existentes.¹¹⁵

FIGURA 9.1 : REDUCCIONES DEL ESPESOR DE LA PARED DE LAS TUBERÍAS DE HIERRO A LO LARGO DEL TIEMPO



9.1.2 LCA de hierro dúctil (DI) y energía incorporada

Según la Asociación de Investigación de Tuberías de Hierro Dúctil (DIPRA, por sus siglas en inglés), la industria de las tuberías de hierro dúctil ha llevado a cabo un LCA.¹¹⁶ Desafortunadamente, los resultados del LCA no se han compartido públicamente y no se pueden utilizar en el presente informe. Sin embargo, se encontraron estudios publicados que analizan la energía incorporada de las tuberías de hierro dúctil. Cuando se compara la energía material de las tuberías como el hierro dúctil, es muy importante tener en cuenta el peso por pie de un producto de tuberías actual. Debido a que el PVC pesa menos que una longitud equivalente de las tuberías de DI,

la energía incorporada real es inferior. Del mismo modo, la cantidad de dióxido de carbono emitido durante la producción de las tuberías de PVC es muy inferior a la del hierro dúctil.

Las fuentes usadas para este estudio suponen que el peso del revestimiento de mortero aumenta en proporción al diámetro de las tuberías de hierro dúctil, por lo que se puede suponer que la energía incorporada del hierro dúctil revestido en mortero por kilogramo es un valor constante.

Para las tuberías de DI, el potencial de corrosión de las paredes interiores y exteriores de las tuberías puede requerir la adición de otros materiales tales como un revestimiento de cemento en el interior y un recubrimiento de polietileno con o sin un biocida anti-microbiano y

un inhibidor de la corrosión, recubrimiento de asfalto u otro material en el exterior. Estos materiales adicionales aumentan el consumo de recursos, la energía incorporada y el impacto ecológico del producto. Al evaluar la sustentabilidad de los productos de las tuberías para el ciclo de vida previsto, es importante comprender y evaluar los impactos del ciclo de vida de todos los materiales utilizados en el sistema de tuberías. La Asociación europea de tuberías y accesorios de plástico (TEPPFA, por sus siglas en inglés) pidió un LCA comparando tuberías de DI y PVC.¹¹⁷ Un estudio del LCA similar fue llevado a cabo por el Laboratorio de Modelización Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña en 2005.¹¹⁸ Aunque estos estudios no incluyen una evaluación de todos los componentes de los sistemas de las tuberías de hierro dúctil, mostraron, al igual que con este estudio, que la tubería de PVC tiene mucho más baja energía incorporada y otros impactos que la tubería de hierro dúctil.

La comprensión de la energía de bombeo durante el ciclo de vida de la tubería es muy importante, ya que esto afecta los costos de operación y el impacto ecológico de la municipalidad durante muchas décadas.

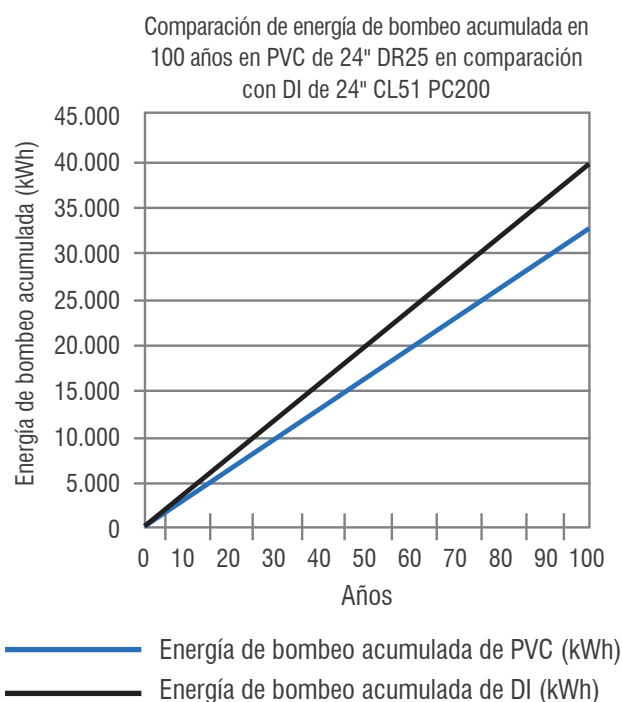
La norma de AWWA para tuberías de DI, AWWA C151, no requiere de la autorización de NSF Internacional para el uso del agua potable. Por lo tanto, con el fin de ser utilizadas para el transporte y la distribución de agua potable, las tuberías de DI deben estar revestidas con un material de revestimiento autorizado por NSF tales como el mortero de cemento o el epoxi. Este revestimiento reduce el diámetro interno y cambia el factor de fricción. Los estudios han documentado que el factor de fricción de los revestimientos de mortero disminuye con el tiempo. Esta resistencia de fricción adicional aumenta el esfuerzo de bombeo para entregar un caudal constante de agua y disminuye la cantidad de agua que se puede entregar en un sistema de distribución con el tiempo.

Al evaluar la sustentabilidad de los productos de las tuberías para el ciclo de vida previsto, es importante comprender y evaluar los impactos del ciclo de vida de todos los materiales utilizados en el sistema de tuberías.

9.1.3 Rendimiento de la etapa de uso de las tuberías de hierro dúctil (DI)

Las tuberías de presión de hierro dúctil comienzan el servicio con un diámetro interno ligeramente mayor que el del PVC. Sin embargo, por lo general cerca del tercer año de vida útil de la tubería de DI se requiere una mayor cantidad de energía de bombeo de las tuberías que para las tuberías de PVC del mismo tamaño nominal y la misma velocidad de flujo. Los costos de energía de bombeo de las tuberías de presión de DI aumentan a lo largo de su vida útil debido a la corrosión interna que incrementa continuamente la resistencia a la fricción, mientras que las del PVC permanecen constantes. La Figura 9.2 delinea la diferencia entre la energía de bombeo acumulativa de 100 años para las tuberías de PVC y las tuberías de presión de DI de 24 pulgadas a la misma velocidad de flujo. La energía de bombeo de DI en la Figura 9.2 incluye el DI reemplazado después de 50 años de servicio con un restablecimiento de su factor de fricción (C). Si se utiliza la tubería de hierro dúctil luego de su vida útil de 50 años, el aumento de resistencia a la fricción provoca altos costos de bombeo, así como gastos de operación y mantenimiento. Como se discutió en el Apéndice, la energía de bombeo acumulativa para tuberías de DI sería mucho mayor que la que se muestra en la Figura 9.2 durante un período de 100 años sin sustitución, ya que la pared interna de la tubería se degrada más y más con el tiempo.

FIGURA 9.2 : COMPARATIVA DE LA ACUMULACIÓN DE ENERGÍA DE BOMBEO A 100 AÑOS EN TUBERÍAS DE PVC Y DI DE 24"



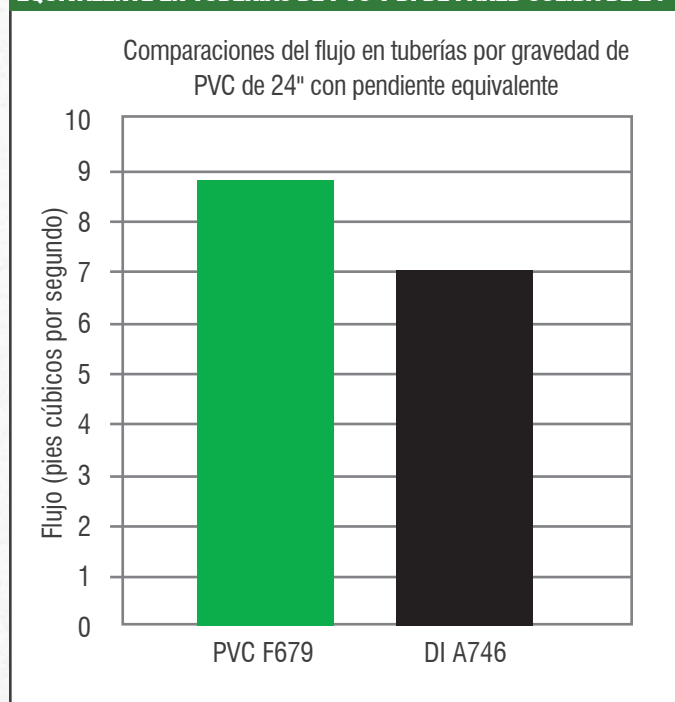
Nota: El gráfico supone la sustitución de las tuberías de DI a los 50 años.

Las tuberías por gravedad de hierro dúctil están sujetas a la corrosión interna y externa que deteriora la tubería hasta el punto de fuga (infiltración/exfiltración) a través de agujeros de corrosión en las paredes. El revestimiento de cemento y el sustrato de hierro dúctil son susceptibles a la corrosión cuando se exponen a un entorno de alcantarillado sanitario. Además, la norma para las tuberías de DI por gravedad, ASTM A746, no requiere que las juntas se prueben para verificar la presión de la tubería externa/vacío interior (presión de la infiltración). La infiltración puede conducir a mayores costos en la planta de tratamiento.

De manera similar, la norma de las tuberías de presión DI, AWWA C151, no requiere que se evalúen las juntas para verificar la presión externa/vacío interno. Este es un importante problema de la calidad del agua teniendo en cuenta que las tuberías con fugas pueden permitir que ingresen los contaminantes potenciales en el sistema de agua durante una caída de presión dinámica (fallo de la bomba o de la válvula, extinción de incendios, u otros cambios de demanda repentina en el sistema), que podrían permitir que el agua subterránea contaminada entre en las tuberías.¹¹⁹ Para las tuberías de gravedad el deterioro de las paredes interiores de las tuberías de DI provoca una mayor resistencia al flujo y un factor n de Manning superior. La mayor fricción hidráulica dentro de las tuberías de DI significa que una tubería de DI por gravedad establecida en la misma pendiente que un tuberías de PVC tendrá menos capacidad hidráulica. La Figura 9.3 compara el flujo de las tuberías de PVC y DI de 24 pulgadas en la misma pendiente.

Como se muestra en la Figura 9.3, el flujo es aproximadamente 20 % mayor en una tubería de PVC de 24 pulgadas que por una tubería equivalente de hierro dúctil de 24 pulgadas cuando se instala con la misma pendiente.

FIGURA 9.3 : COMPARACIÓN DEL FLUJO CON PENDIENTE EQUIVALENTE EN TUBERÍAS DE PVC Y DI DE PARED SÓLIDA DE 24"



9.2 Tuberías de concreto

Mientras que el concreto se considera a menudo como que tiene baja energía incorporada por libra producida, la industria del cemento es uno de los mayores emisores de gases de efecto invernadero en el mundo, clasificada como el tercer emisor más grande. La industria del cemento comunicó que más del 5 % de las emisiones de dióxido de carbono del mundo se deben al consumo de carbón en los hornos de piedra y la descomposición de la caliza.¹²⁰

La Asociación de Tuberías de Concreto en el Reino Unido, con el apoyo de la Asociación Británica de Cemento, publicó un estudio de LCA sobre tuberías de concreto. Los datos primarios de este estudio son de 1999 y 2000, los cuales no cumplen con las recomendaciones temporales de calidad de datos requeridas por la norma ISO 14044. Las diferencias en las metodologías y presunciones del LCA impiden la comparación exacta.

Las tuberías de concreto no reforzado (NRCP, por sus siglas en inglés) tienen un estimado de 1,34 MJ/kg de energía incorporada,¹²¹ mientras que las tuberías de concreto pretensado tienen 3,74 MJ/kg.¹²² Este informe detalla una estimación de la energía incorporada de un sistema de tuberías de concreto comparable basado en la energía incorporada determinada y los pesos de la tubería obtenidos a partir de la bibliografía y las normas de productos de los fabricantes.

La Comisión Europea encargó en 2004 una extensa revisión de la bibliografía del LCA del PVC en diversas aplicaciones (lo que incluyó tuberías), por la que se revisaron y resumieron docenas de estudios de LCA. Varios de estos estudios confirmaron que las tuberías de desagüe de plástico, incluidas las de PVC, causan menos impactos en el ciclo de vida en todas las categorías del calentamiento global, los residuos municipales, la acidificación, el smog de verano y el enriquecimiento de nutrientes en comparación con tuberías de concreto similar.¹²³

9.2.1 Vida útil de la tubería de concreto no reforzado (NRCP)

Se presume que las tuberías por gravedad de concreto no reforzado tienen una vida útil de 50 años debido a la corrosión del material de las tuberías en las aplicaciones de alcantarillado sanitario. El NRCP es más propenso a colapsar porque no tiene el acero estructural de refuerzo para soportar parcialmente la tubería mientras la mitad superior de la tubería se disuelve debido a la condensación de sulfuro de hidrógeno. Las tuberías de concreto son difíciles de reparar/rehabilitar con un material de revestimiento no estructural, ya que la pérdida de la pared de la tubería por la corrosión disminuye la resistencia estructural de la pared restante.

9.2.2 Tiempo de vida útil de las tuberías de cilindro de concreto pretensado (PCCP)

Se utilizó una vida útil de 75 años para PCCP debido a las fallas documentadas de los cables de pretensado y la degradación del revestimiento de mortero con el correr del tiempo.¹²⁴ Los cloruros y los sulfatos pueden reaccionar con materiales de cemento y eventualmente erosionar la tubería de concreto.

La norma AWWA para tubería de presión de concreto pretensado, AWWA C301, no requiere certificación NSF/ANSI 61 para el uso del agua potable. Con la norma AWWA que permite el uso de las cenizas volantes, humo de sílice y otros aditivos de concreto, y la tendencia de las tuberías de concreto a agrietarse, los revestimientos y el núcleo interno de las tuberías de concreto pueden lixiviar materiales peligrosos tales como arsénico, berilio, cromo, plomo, manganeso, mercurio y selenio en el agua potable. Los estudios han documentado que el factor de fricción del concreto disminuye con el tiempo. Este aumento de la resistencia de fricción aumenta el esfuerzo de bombeo para entregar un flujo constante de agua, y disminuye la cantidad de agua que se puede entregar en un sistema de distribución con el correr del tiempo.

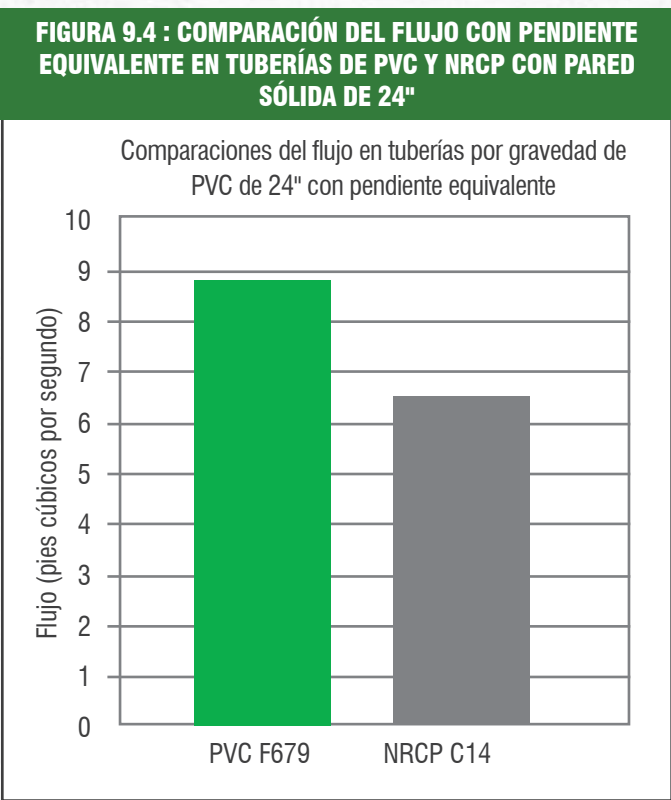
9.2.3 Rendimiento de la etapa de uso de las tuberías de concreto no reforzado (NRCP)

La energía de la etapa de uso de las tuberías de concreto se ve afectada significativamente por la corrosión y el deterioro de la propia tubería para aplicaciones por gravedad en alcantarillado.

Las tuberías por gravedad de concreto son propensas a la corrosión interna que deteriora la tubería hasta el punto de fuga (infiltración) a través de agujeros de corrosión en las paredes y eventualmente a fallas estructurales de la tubería. Las paredes interiores de la tubería de concreto son susceptibles a la corrosión cuando se exponen a una atmósfera de alcantarillado sanitario. Los manuales de diseño afirman que esta corrosión puede ser tanto como una pulgada de espesor de pared por año en entornos con alto contenido de sulfuro. Por esta razón, muchas especificaciones de la ciudad que permiten el uso de las tuberías de concreto para las alcantarillas requieren el diseño de materiales de concreto o revestimiento de sacrificio adicionales, tales como el PVC.

Las normas para las tuberías de concreto por gravedad, ASTM C14 y ASTM C76, no requieren que las juntas se prueben contra la presión de la infiltración. Las normas para las tuberías de alcantarillado de PVC requieren que las juntas se prueben al vacío para asegurar que no tendrán fugas debido a la presión hidrostática externa (infiltración). El deterioro de las paredes internas de las tuberías de concreto provoca una mayor resistencia al flujo y un factor n de Manning superior. La mayor fricción en la pared de la tubería de concreto significa que una tubería de concreto por gravedad colocada sobre la misma pendiente que una tubería de PVC tendrá menos capacidad hidráulica. La Figura 9.4 compara el flujo de PVC de 24 pulgadas y

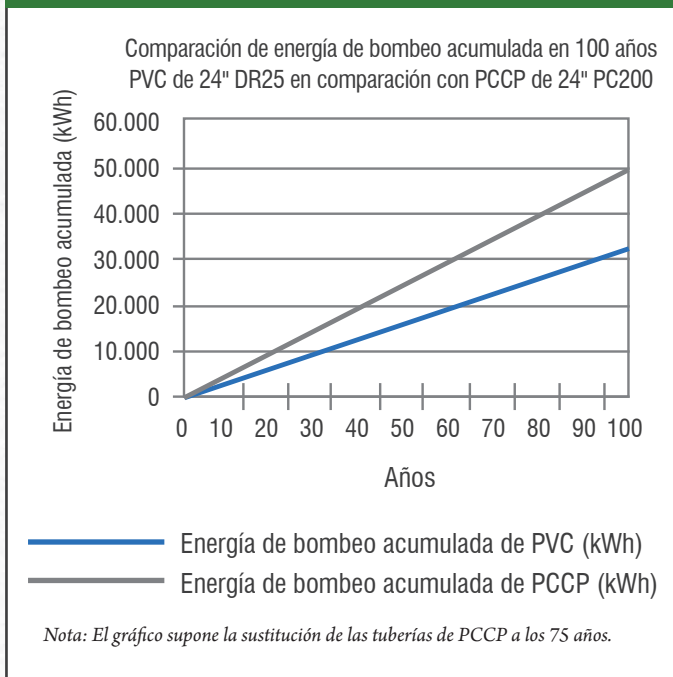
las tuberías de concreto en la misma pendiente. Como se muestra en la Figura 9.4, el flujo es menor para una tubería de concreto de 24 pulgadas que para una tubería de alcantarillado de PVC de 24 pulgadas equivalente en pendientes equivalentes.



9.2.4 Rendimiento de la etapa de uso de las tuberías con cilindro de concreto pretensado (PCCP)

La energía de etapa de uso de la tubería de concreto se ve afectada significativamente por el deterioro del factor de fricción de la pared interior de la tubería en las tuberías de presión.

Modeladas como parte de este estudio, las tuberías de presión de concreto comienzan el servicio con un diámetro interno ligeramente más grande y una fricción interna mayor que las de PVC. Debido a que la fricción interna continúa aumentando durante la vida útil de la tubería, las tuberías de presión de concreto requerirán una mayor energía de bombeo que las de PVC durante la vida útil prevista para el mismo tamaño nominal y la misma velocidad de flujo. La Figura 9.5 delinea la diferencia entre la energía de bombeo acumulada en 100 años para tuberías de PVC de 24 pulgadas DR25 y PCCP de 24 pulgadas PC200 a la misma velocidad de flujo. La energía de bombeo en la Figura 9.5 incluye el PCCP que es reemplazo después de 75 años de servicio con un restablecimiento de su factor de fricción. Como se discutió en el Apéndice, la energía de bombeo acumulada para el PCCP sería mucho mayor que la que se muestra en la Figura 9.5 durante un período de 100 años sin reemplazo, ya que la pared interna de la tubería se degrada más y más con el tiempo, aumentando los costos de bombeo.

FIGURA 9.5 : COMPARATIVA DE LA ACUMULACIÓN DE ENERGÍA DE BOMBEO A 100 AÑOS EN TUBERÍAS DE PVC Y PCCP DE 24"

9.3 Tuberías de polietileno y polipropileno

9.3.1 Vida útil de las tuberías de polietileno (HDPE)

La HDPE se usa para instalaciones de agua, alcantarillado sanitario y aguas pluviales. Se considera que las tuberías de presión de HDPE tienen una vida útil de 50 años debido al deterioro por deformación y oxidación por cloro y otros productos químicos que limitan su longevidad.¹²⁵ La expectativa de vida útil de las tuberías de HDPE 4710 de paredes más finas es solo aproximadamente la mitad que la de las tuberías de HDPE 3608 de pared más gruesa de acuerdo con los resultados de pruebas independientes.¹²⁶ La tubería de HDPE 3408 fue incluida en la Norma C906-07 con un factor de seguridad de 2,0. La HDPE 3408 no figura en la Norma C906-15. Ha sido reemplazada o ha cambiado de nombre con otros compuestos en la nueva norma. La HDPE 4710 tiene un factor de seguridad de solo el 1,6 (igual a un factor de diseño de 0,63).

El *Manual de prácticas de suministro de agua MSS, para el diseño y la instalación de tuberías de PE* de la AWWA, tiene una referencia a una vida de 50 años y no hay referencia a ninguna recomendación para una mayor vida útil.¹²⁷ La dificultad para determinar la longevidad de las HDPE se debe a los efectos de los desinfectantes, la presión y la temperatura en las tuberías. Otros factores, tales como defectos

de las tuberías y daños durante la instalación pueden acelerar las fallas. Las demandas de mejoras en la resistencia a la degradación por desinfectantes con el nuevo compuesto de resina, PE4710, bien pueden ser más que compensadas por la reducción en el espesor de la pared de las tuberías, el aumento de la tensión de la pared asociado con el diseño y la reducción del factor de seguridad. La vida útil de las HDPE 4710 aún no se ha probado y carece de muestras de campo y de estudios de extracción. Teniendo en cuenta la investigación, a los fines de comparación en este estudio, se utilizó una vida útil de 50 años.^{128 129 130} Esto puede ser exagerado dado el rendimiento y la longevidad indocumentados de las nuevas tuberías de HDPE 4710 y su menor factor de seguridad.

La vida útil de una tubería puede verse afectada por la corrosión, la instalación, la tensión, el estrés y otros factores. Aunque la degradación por corrosión es común para las tuberías de metal, las tuberías de plástico no son susceptibles a la corrosión electroquímica. La oxidación por exposición constante a un desinfectante clorado ha generado cierta preocupación; sin embargo, los estudios y las pruebas han concluido que la tubería de PVC no es propensa a la oxidación después de la exposición al cloro o ClO_2 (dióxido de cloro).¹³¹ Otros materiales plásticos, tales como las HDPE, son susceptibles a esta oxidación que afecta a la durabilidad de estos productos.^{132 133 134} Las tuberías de HDPE, polipropileno y fibra de vidrio son susceptibles a la deformación por fluencia. La deformación por fluencia puede ser un factor en la vida útil de estos productos cuando se utiliza en aplicaciones por gravedad. Estos y otros factores influyen en las decisiones de diseño sobre la estimación de la vida útil de un material de tubería en su entorno operativo, cumpliendo con todos sus niveles de servicio sustentable.

La investigación indica que el dióxido de cloro es el desinfectante más agresivo, seguido del cloro y luego las cloraminas. Las tuberías de HDPE pueden experimentar oxidación en la superficie de la pared interior al utilizarse desinfectantes con cloro, dióxido de cloro y cloramina. La penetración debido a la difusión de oxidante y los ataques de radicales libres dan como resultado un agrietamiento adicional en la estructura de la pared de las tuberías mientras están bajo presión.^{135 136}

Un estudio que analiza el comportamiento estructural de 22 tuberías sin presión de HDPE en Texas mostró que el 100 % de las tuberías evaluadas sufría de al menos un tipo de falla, tal como agrietamiento/rotura, deformación excesiva, desplazamiento de juntas, curvatura inversa y pandeo. Este estudio es significativo debido a que la tubería se instaló bajo la inspección del departamento de transporte del estado y de acuerdo con los procedimientos estándar para tuberías de HDPE. Otra consideración para las tuberías de HDPE por gravedad de perfil de pared es que el crecimiento de la ondulación puede ser significativo, lo que requeriría el uso de un mayor valor de n de Manning para tener en cuenta el aumento de la rugosidad de la tubería con el tiempo.¹³⁷

9.3.2 Energía incorporada de la tubería de polietileno (HDPE)

El Equipo de Investigación de Energía Sustentable de la Universidad de Bath desarrolló un inventario del carbono y la energía de varios materiales, incluidas las tuberías de HDPE, que fue publicado en 2011.¹³⁸ Se informó que la energía incorporada de la tubería de HDPE es de 84,4 MJ/kg, con un impacto ecológico incorporado de 2,54 kg CO₂/kg. La HDPE tiene una mayor energía incorporada que el PVC equivalente cuando el espesor de la pared y el peso por pie se toman en consideración.

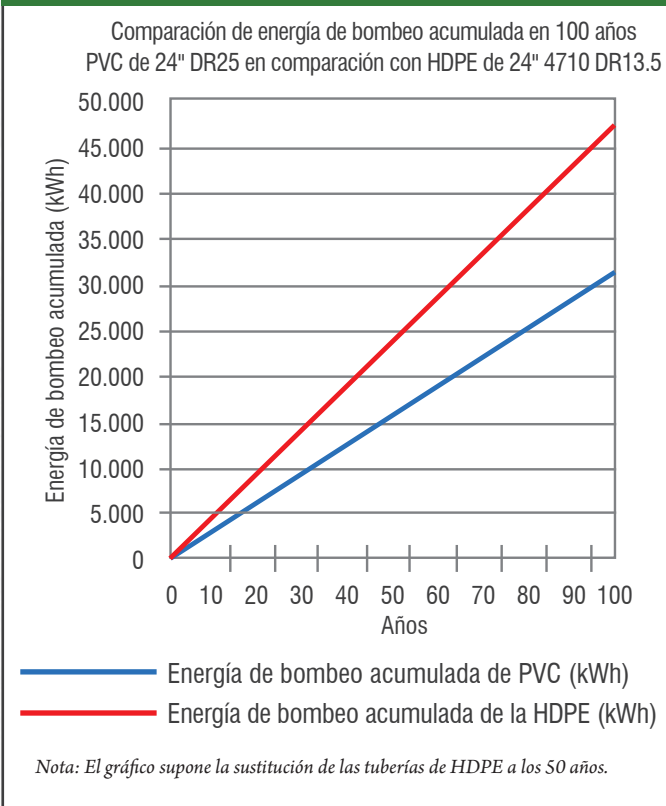
9.3.3 Rendimiento de la etapa de uso de las tuberías de polietileno (HDPE)

La tensión circunferencial de la tubería de polietileno para establecer la base del diseño hidrostático es solo un 40 % de la de las tuberías de PVC. Debido a su baja resistencia a la tracción, las tuberías de presión de HDPE deben tener paredes más gruesas para producir tuberías con una clase de presión comparable a las del PVC. Las paredes más gruesas de la tubería de HDPE se traducen en un diámetro interno más pequeño y una zona de transporte de flujo más pequeña. Las tuberías de presión de HDPE y PVC tienen factores de fricción interna similares. La energía incorporada para la etapa de uso para el ciclo de vida del HDPE es mucho mayor que la del PVC debido a la zona de transporte más pequeña del polietileno. A modo de comparación, las tuberías de PVC de 8 pulgadas DR18 tienen una zona de transporte un 33,2 % más grande que las tuberías de HDPE comparables, y una tubería de PVC de 24 pulgadas DR25 tiene una zona de transporte un 17,9 % más grande que las tuberías de HDPE equivalentes. La Figura 9.6 representa claramente la mayor energía de bombeo a 100 años requerida para tuberías de 24 pulgadas de HDPE 4710 DR13.5 en comparación con las tuberías de PVC de 24 pulgadas DR25.

9.3.4 Vida útil de tuberías de polipropileno (PP)

Las tuberías de polipropileno para aplicaciones con gravedad tienen una vida útil de cincuenta años debido a la deformación por fluencia y la reducción de su módulo de elasticidad a largo plazo. Las tuberías de polipropileno se utilizan para aplicaciones de aguas pluviales y de drenaje sanitario. El polipropileno tiene una energía incorporada estimada de 81 MJ/kg según un estudio de Franklin Associates.¹³⁹ Los datos de Franklin confirman los supuestos para el polipropileno aplicados en este estudio.

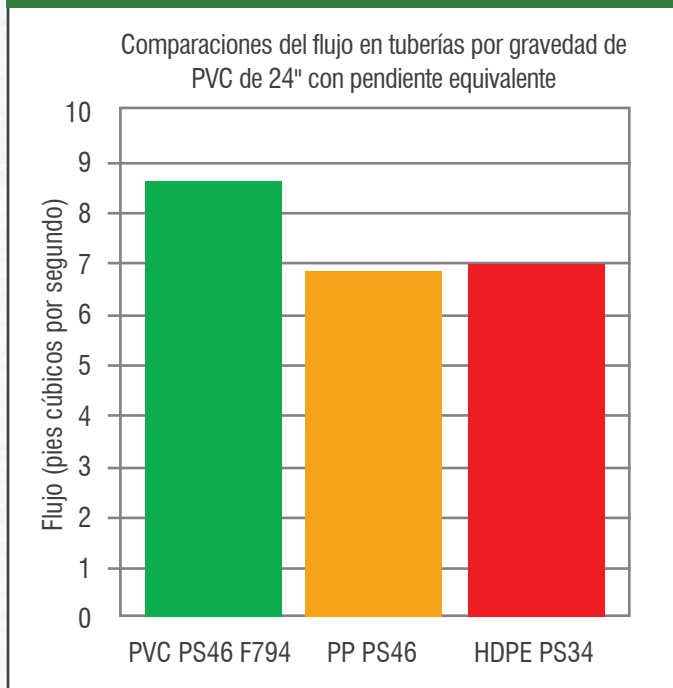
FIGURA 9.6 : COMPARATIVA DE LA ACUMULACIÓN DE ENERGÍA DE BOMBEO A 100 AÑOS EN TUBERÍAS DE PVC Y HDPE DE 24"



9.3.5 Rendimiento del uso-etapa de tuberías por gravedad para perfil de pared de polietileno de alta densidad (HDPE) y polipropileno (PP)

Las tuberías por gravedad de polietileno de alta densidad y de polipropileno tienen paredes interiores lisas con corrugaciones anulares con o sin paredes exteriores lisas. Las paredes interiores lisas de las tuberías de polietileno de alta densidad y polipropileno son muy delgadas, lo que provoca la reverberación de las corrugaciones anulares en las paredes interiores de las tuberías. La superficie ondulada de la pared interior de la tubería corrugada de polietileno de alta densidad y polipropileno puede causar mayor fricción hidráulica que las tuberías de PVC de pared sólida o pared corrugada. El aumento de la fricción de las tuberías hace que las tuberías de gravedad de polietileno de alta densidad y polipropileno colocadas en la misma pendiente que tuberías de PVC tengan menos capacidad hidráulica. La Figura 9.7 compara el flujo de tuberías de PVC, polietileno de alta densidad de 24 pulgadas y polipropileno de 24 pulgadas en la misma pendiente.

FIGURA 9.7 : COMPARACIÓN DE FLUJO CON PENDIENTES EQUIVALENTES DE LAS TUBERÍAS DE 24" PARA PERFIL DE PARED DE PVC, PP Y HDPE



Las tuberías de HDPE y PP son propensas a la deformación por fluencia. La deformación por fluencia es una característica de algunos materiales según la cual, cuando se someten a una carga, las tuberías seguirán doblándose lentamente bajo la carga con el correr del tiempo. Para tuberías por gravedad de HDPE y PP enterradas, la deformación por fluencia significa que las tuberías continuarán desviándose con el paso del tiempo. Las normas para tuberías por gravedad de HDPE y PP consideran la deformación por fluencia durante la vida útil esperada de las tuberías.

- ▶ Para las tuberías de HDPE, la resistencia a la tracción de 50 años puede disminuir a menos de un tercio de la resistencia inicial a la tracción y el módulo de elasticidad de 50 años puede disminuir a un quinto del módulo inicial de elasticidad.
- ▶ Para las tuberías de PP, la resistencia a la tracción de 50 años puede disminuir a menos de un tercio de la resistencia inicial a la tracción y el módulo de elasticidad de 50 años puede disminuir a una sexta parte del módulo inicial de elasticidad.

Como la mayoría de los diseñadores de tuberías utilizan el módulo de corto plazo para los límites de tensión, las deflexiones a largo plazo pueden conducir a un fallo en las juntas y en la pared de las tuberías. Los diseñadores deben tomar en cuenta la disminución de la resistencia estructural de las tuberías de polietileno de alta densidad y de las de polipropileno para que el diseño dure hasta cincuenta años. Una mayor duración requerirá rellenos especiales, más costosos y también diseños especiales.

En el apéndice pueden encontrarse comparaciones adicionales, incluso para tuberías de PVC para perfil de pared.

9.4 Tuberías de arcilla

La arcilla vitrificada se ha utilizado para las tuberías de alcantarillado en los EE. UU. desde finales de 1800.

9.4.1 Vida útil de las tuberías de arcilla vitrificada (VCP)

Las tuberías por gravedad de arcilla vitrificada han tenido antecedentes de fallas estructurales en los suelos arcillosos expansivos (que afectan al 75 % de América del Norte). Las VCP también han sido objeto de fallas en las juntas de las tuberías debido a la intrusión de raíces que causaron grietas en las tuberías a pesar de que estos problemas pueden permitir que las tuberías sigan funcionando parcialmente. Desde un punto de vista operativo y de mantenimiento, la tubería puede ser funcionalmente obsoleta mucho antes del final de su vida útil prevista.¹⁴⁰ Antes de la instalación, se debe revisar la ovalización de las tuberías de arcilla para confirmar que están dentro de la tolerancia de especificación. Las VCP son propensas a la rotura de la campana/junta durante el transporte, la instalación y el uso. Como resultado de su fragilidad, a las VCP se les asigna una vida útil de 50 años. Cabe señalar que durante todo el período de su uso, las VCP requieren un mantenimiento significativo en relación con la limpieza de las intrusiones de raíces y hacer frente a las interrupciones del servicio y a los derrames. A su vez, los costos de operación para las VCP son altos debido a su susceptibilidad a la infiltración, lo que aumenta el volumen de aguas residuales a tratar. La infiltración también puede resultar en multas reglamentarias e impactos presupuestarios para reemplazos de mejoras de capital requeridos.

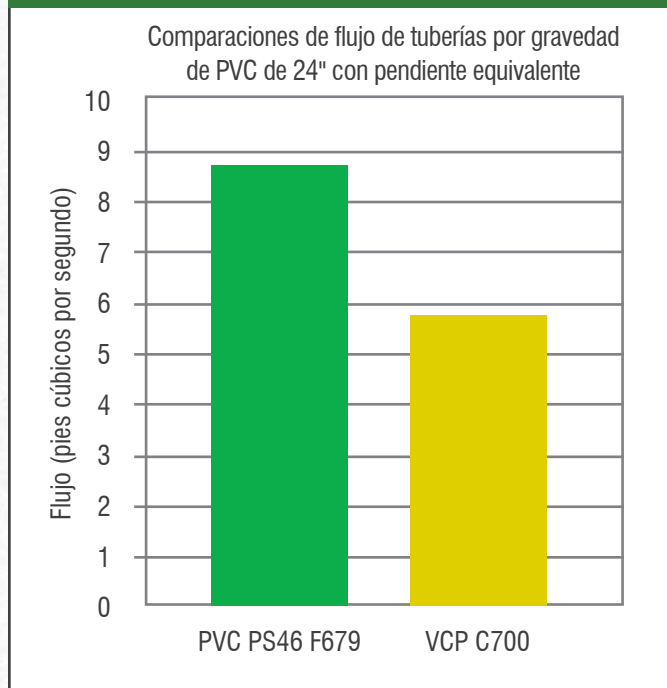
9.4.2 Energía incorporada en tuberías de arcilla vitrificada (VCP, por sus siglas en inglés)

La energía incorporada de las tuberías de arcilla vitrificada es de 7,9 MJ/kg, mientras que las emisiones de carbono son de 0,55 kg CO₂/kg de tubería.¹⁴¹ NCPI, el Instituto Nacional de Tuberías de Arcilla, ha obtenido la certificación SMaRT. Para obtener esta certificación, debe realizarse un análisis del ciclo de vida. Lamentablemente, el organismo de certificación y la asociación de la industria no han publicado estos resultados. Este *análisis del ciclo de vida de las tuberías de PVC de agua y alcantarillado y el análisis comparativo de la sustentabilidad de los materiales de las tuberías* detalla una estimación de la energía incorporada de un sistema de tuberías comparable con base en la energía incorporada determinada y los pesos de las tuberías obtenidos a partir de la literatura y las normas de los fabricantes.

9.4.3 Rendimiento uso-etapa de tuberías de arcilla vitrificada (VCP, por sus siglas en inglés)

Las ondulaciones en las paredes interiores de tuberías nuevas por gravedad de arcilla vitrificada aumentan la fricción hidráulica. Las tuberías de arcilla vitrificada tienen una tendencia a que los componentes de las aguas residuales (en especial, la grasa) se adhieran a las paredes de la tubería. La materia recogida en las paredes de la tubería aumenta la fricción hidráulica. La tubería de arcilla vitrificada es una tubería rígida con una baja resistencia a la tracción. Una tubería rígida, por su naturaleza, soporta más carga de la sobrecapa que una tubería flexible. Si la tubería no se carga de manera uniforme, el esfuerzo de tensión puede causar agrietamiento. Cuando la tubería experimenta esfuerzo debido a una instalación imperfecta (por las conexiones de servicio a la tubería, juntas muy desviadas, carga desigual o movimiento de los suelos circundantes), las paredes de la tubería pueden agrietarse. Las grietas en tuberías de arcilla vitrificada pueden causar irregularidades en las paredes de la tubería que pueden aumentar aún más la fricción hidráulica. Las grietas en las paredes de las tuberías pueden permitir la intrusión de raíces que reducen el área de flujo y la capacidad hidráulica. El factor de fricción para las tuberías de arcilla vitrificada es ampliamente reconocido como no tan bueno en tuberías de PVC de pared sólida y pared corrugada. El aumento de la fricción de las tuberías hace que las tuberías de gravedad de arcilla vitrificada colocadas en la misma pendiente que tuberías de PVC tengan menos capacidad hidráulica. La Figura 9.8 compara el flujo de tuberías de PVC y de arcilla vitrificada de 24 pulgadas en la misma pendiente. Cabe señalar que el mal desempeño del flujo de tuberías de arcilla vitrificada en comparación con tuberías de PVC sería aún peor que el que se muestra si las grietas, juntas articuladas e intrusiones de raíces se incluyeron en los cálculos hidráulicos. Las tuberías de arcilla vitrificada agrietadas permiten la infiltración y las afluencias en la tubería. Históricamente, los sistemas de recolección de tuberías de arcilla vitrificada han contribuido con los problemas de filtración e infiltración que llevaron a cuestiones reglamentarias y planes de recuperación masiva.^{142 143}

FIGURA 9.8 : COMPARACIÓN DEL FLUJO CON PENDIENTE EQUIVALENTE DE TUBERÍAS DE ARCILLA VITRIFICADA Y PVC DE PARED SÓLIDA DE 24"



9.5 Resumen de atributos ambientales y desempeño de materiales alternativos de tuberías

La Tabla 9.1 enumera la energía incorporada de la cuna a la puerta de 100 pies de tubería para PVC y por cada material similar en especificación con los productos de PVC analizados en el estudio. Al comprender que el resultado de cada material deriva de una fuente diferente con un grado variable de calidad de los datos, estos datos todavía pueden ilustrar con precisión posibles valores de la cuna a la puerta de energía incorporada para las diferentes tuberías.

Al comparar la energía material de las tuberías, es muy importante tener en cuenta el peso por pie de una tubería real porque el peso influye directamente en la energía incorporada y el impacto ecológico.

TABLA 9.1 : RESUMEN DE LA ENERGÍA INCORPORADA DE LA CUNA A LA PUERTA PARA PVC Y MATERIALES ALTERNATIVOS DE TUBERÍAS

Medida del PVC y producto	Productos comparables	Estándar	Energía incorporada (MJ/100 pies)
PVC de 8" DR18 PC235 C900	PVC de 8" DR18	AWWA C900	23.300
	HDPE de 8" 4710 DR9	AWWA C906	42.600
	DI de 8" CL51	AWWA C151	50.900
PVC de 8" DR25 PC165 C900	PVC de 8" DR25	AWWA C900	15.900
	HDPE de 8" 4710 DR13.5	AWWA C906	29.600
	DI de 8" CL51	AWWA C151	50.900
PVC de 24" DR25 PC165 C905	PVC de 24" DR25	AWWA C905	137.900
	HDPE de 24" 4710 DR13.5	AWWA C906	240.800
	DI de 24" CL51	AWWA C151 AWWA C104	206.600
	PCCP de 24" PC200	AWWA C301	53.500
PVC de 24" PS46 F794 perfil de pared	PVC de 24" PS46	ASTM F794 AASHTO M304	49.700
	PP de 24" PS46	ASTM F2736	43.700
	HDPE de 24" PS34	ASTM F2306	42.900
PVC DE 8" PS46 F794 perfil de pared	PVC DE 8" PS46	ASTM F794 AASHTO M304	5.900
	DI de 8"	ASTM A746	46.500
PVC de 8" PS46 SDR35 D3034 pared sólida	PVC DE 8" PS46	ASTM D3034	10.000
	DI de 8"	ASTM A746	46.500
	8" VCP	ASTM C700	10.800
PVC de 24" PS46 F679 pared sólida	PVC de 24" PS46	ASTM F679	98.600
	DI de 24"	ASTM A746	176.600
	VCP de 24"	ASTM C700	82.400
	NRCP de 24"	ASTM C14	21.300

Nota: Todas las tuberías de presión de hierro dúctil en este estudio están revestidas con cemento según la norma AWWA C104.

Todas las tuberías de alcantarillado de hierro dúctil en este estudio están doblemente revestidas con cemento según la norma AWWA C104.

AHORRO DE ENERGÍA DE BOMBEO EN TUBERÍAS DE PVC

En la Figura 10.1 se presentan tres escenarios de tuberías de presión. Este análisis de muestra supone que la fricción hidráulica de cada tubería aumentó con el tiempo a su tasa normal. Cada tubería se analizó usando la misma tasa de flujo (en gpm = galones por minuto) para cada clase de presión; la tasa de flujo se basó en una velocidad de fluido de la tubería de PVC de 2 pies por segundo (fps). La razón de esto es que los servicios públicos procesan y venden agua sobre una base volumétrica. La velocidad del fluido de la tubería elegida está dentro del rango de uso para los tamaños de tubería seleccionados para este estudio. El uso de una tasa de flujo común permitió comparaciones precisas entre los materiales de tuberías con diferentes diámetros internos y factores C de Hazen-Williams.

Para el primer ejemplo de diseño, la tubería de PVC DR18 PC235 de 8 pulgadas se comparó con tuberías equivalentes de polietileno de alta densidad y hierro dúctil de clases de presión similares. El segundo ejemplo de diseño comparó tuberías de PVC DR25 PC165 de 8 pulgadas con tuberías comparables de polietileno de alta densidad y hierro dúctil de clases de presión similares. El tercer escenario también examina tuberías de PVC DR25 PC165 de 24 pulgadas con tuberías equivalentes de polietileno de alta densidad, hierro dúctil y concreto pretensado de clases de presión similares.

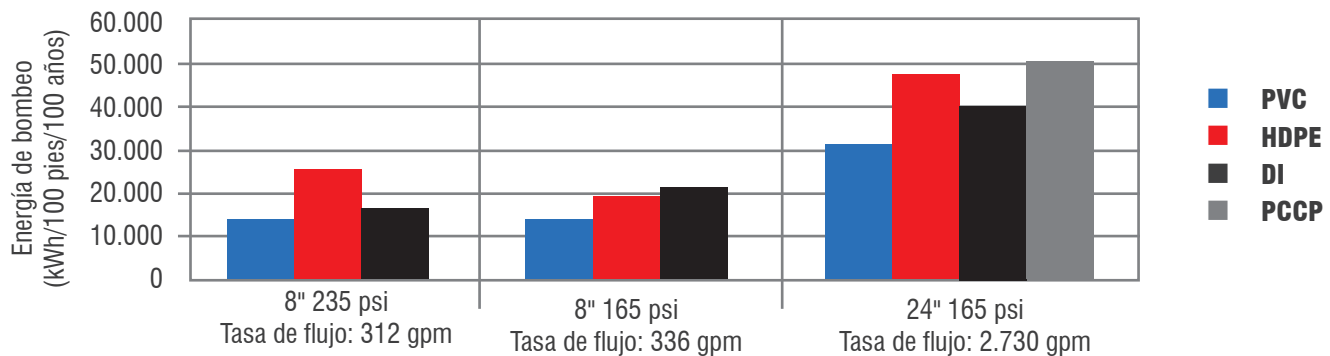
El análisis para cada tamaño de tubería y clase de presión implicó el cálculo y la suma de la energía de bombeo anual necesaria para la tasa de flujo común durante un período de ciclo de vida de 100 años de 100 pies de tubería sobre la base de un diámetro interno de cada tubería, el deterioro del factor C a lo largo del tiempo, una eficiencia común de la bomba y una eficiencia común del motor. Los resultados para los tres análisis se muestran en la Figura 10.1. El uso de energía de bombeo para tuberías de PVC DR18 de 8 pulgadas es del 23 % menos que la tubería de hierro dúctil, mientras que la tubería de PVC DR25 de 8 pulgadas usa un 35 % menos de energía de bombeo que la tubería de hierro dúctil equivalente. La energía de bombeo es significativa. Suponiendo que hay 1,2 millones de millas de tuberías de abastecimiento de agua en los Estados Unidos y que el 66 % de ellas son de 8 pulgadas y más pequeñas,¹⁴⁴ el ahorro de energía durante un período de 100 años mediante el uso de tuberías de PVC en lugar de hierro dúctil y utilizando el consumo de energía a partir de estos ejemplos es de hasta 298 mil millones de kWh. A un costo de energía eléctrica de USD 0,07 por kWh, esto representaría un ahorro de hasta USD 21 mil millones para el uso de tuberías de PVC en lugar de tuberías de hierro dúctil.

La energía de bombeo requerida para tuberías de PVC DR18 de 8 pulgadas es del 50 % menos que de la tubería de polietileno de alta densidad, mientras que la tubería de PVC DR25 de 8 pulgadas usa un 33 % menos de energía de bombeo. Dicho de otra manera, para tuberías equivalentes de 8 pulgadas, la demanda primaria de energía de bombeo es tanto como un 100 % mayor para tuberías de polietileno de alta densidad que de PVC. En estas comparaciones, las tuberías de polietileno de alta densidad de 8 pulgadas utilizan el doble de energía de bombeo en comparación con tuberías de PVC DR18 y 1.5 veces la energía de bombeo de tuberías de PVC DR25. El ahorro de energía durante un período de 100 años mediante el uso de PVC en lugar de polietileno de alta densidad y utilizando el consumo de energía a partir de estos ejemplos es de hasta 532 mil millones de kWh. A un costo de energía eléctrica de USD 0,07 por kWh, esto representaría un ahorro de hasta USD 37 mil millones para el uso de tuberías de PVC en lugar de tuberías de polietileno de alta densidad.

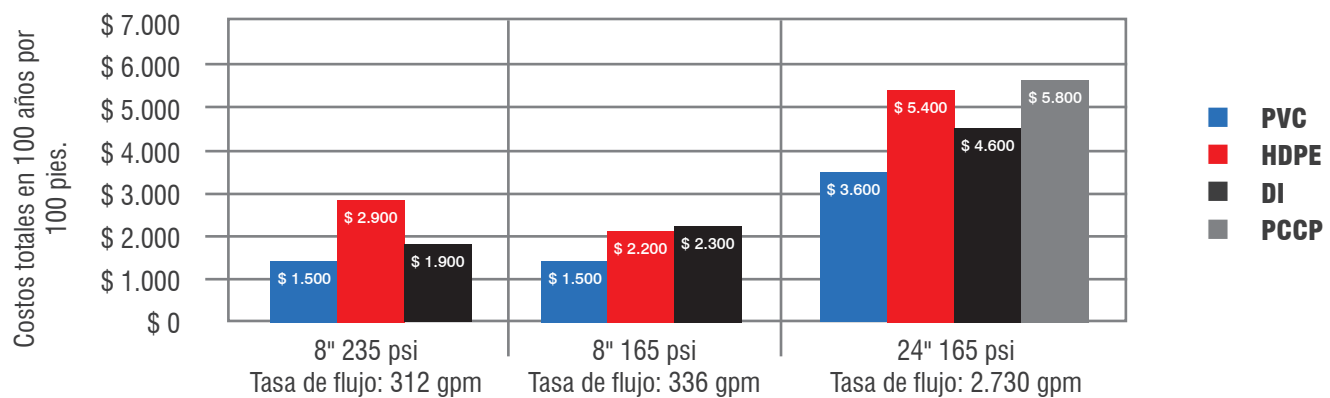
10.1 Ahorro en el costo de energía de bombeo en tuberías de PVC

El consumo de energía se traduce en costos cuando se considera la energía eléctrica para el bombeo. Los tres escenarios de tuberías toman en cuenta el costo de energía de bombeo usando las tarifas eléctricas promedio actuales e incrementándolas un centavo por década en el ciclo de vida de 100 años. Las diferencias de costo total de la energía de bombeo en 100 años para PVC y los materiales alternativos se muestran en la Figura 10.2.

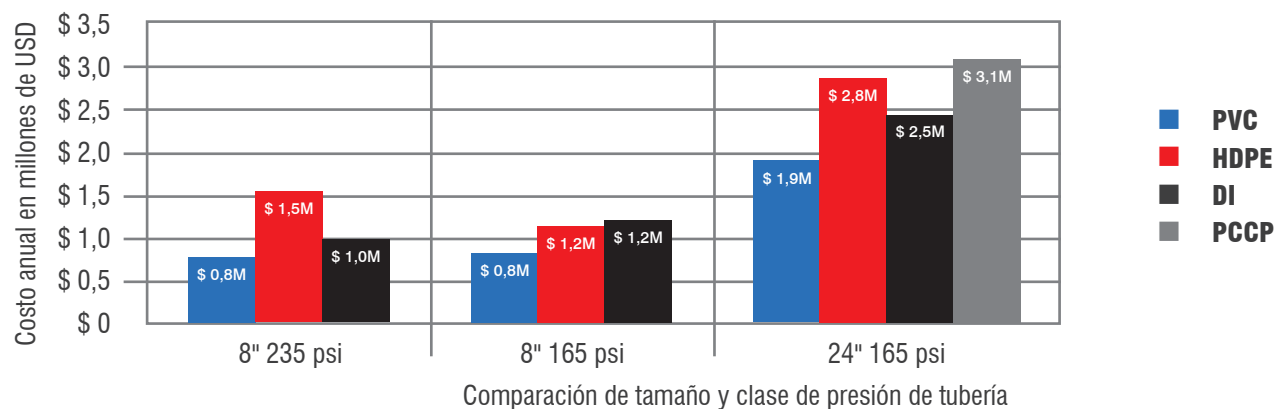
Los servicios públicos medianos a grandes suelen tener 1000 millas de tuberías, de modo que el posible ahorro de usar tuberías de PVC puede ser significativo. Este estudio utilizó un flujo común generado por un equivalente de 2 pies por segundo de velocidad en una tubería de PVC para el análisis de las diversas opciones de material de la tubería. En base a esto, se calculó el ahorro anual de costo de bombeo promedio en 100 años. El ahorro para un servicio público que usa tuberías de PVC de 8 pulgadas en comparación con tuberías equivalentes de hierro dúctil es de hasta USD 440.000 por año. El ahorro para tuberías de PVC de 8 pulgadas en comparación con tuberías de polietileno de alta densidad es de hasta USD 770.000 por año. Los costos de energía para estas redes de 1000 millas de tuberías de 8 pulgadas se muestran en la Figura 10.3. Consulte el Apéndice para ver la metodología de cálculo.

FIGURA 10.1: COMPARACIÓN DE USO DE ENERGÍA TOTAL DE BOMBEO EN 100 AÑOS POR 100 PIES DE TUBERÍA

Nota: El gráfico supone la sustitución de tuberías de polietileno de alta densidad a los 50 años, tuberías de hierro dúctil a los 50 años y de concreto pretensado a los 75 años.

FIGURA 10.2: COMPARACIÓN DE COSTOS TOTALES EN 100 AÑOS DE ENERGÍA DE BOMBEO POR 100 PIES DE TUBERÍA

Nota: El gráfico supone la sustitución de tuberías de polietileno de alta densidad a los 50 años, tuberías de hierro dúctil a los 50 años y de concreto pretensado a los 75 años.

FIGURA 10.3: COMPARACIÓN DE LOS COSTOS PROMEDIO ANUALES DE ENERGÍA DE BOMBEO POR 1000 MILLAS DE TUBERÍA SOBRE LA BASE DE 2 PIES POR SEGUNDO DE VELOCIDAD

El ahorro anual de costo de bombeo promedio de tuberías de 8 pulgadas utilizando PVC en lugar de hierro dúctil puede ser de hasta USD 440.000 y el ahorro utilizando PVC en lugar de polietileno de alta densidad puede ser de hasta USD 770.000.

Nota: El gráfico supone la sustitución de tuberías de polietileno de alta densidad a los 50 años, tuberías de hierro dúctil a los 50 años y de concreto pretensado a los 75 años.

Las comparaciones también se proporcionan para tuberías principales de transmisión de agua de 24 pulgadas para demostrar el potencial de ahorro para tuberías de gran diámetro. Los materiales alternativos de tuberías demostraron tener mayores costos de operación que las tuberías de PVC: El concreto pretensado tiene un costo operativo 60 % más alto; el polietileno de alta densidad es 49 % más alto; y el hierro dúctil es un 28 % más caro para operar que las tuberías de PVC.

Con base en la demanda promedio per cápita del sistema de distribución de agua en los EE. UU., la velocidad promedio para tuberías de 8 pulgadas es de entre 0,3 y 0,5 pies por segundo. Se usó una velocidad de 0,4 pies por segundo para proporcionar una tasa de flujo realista de comparación para todos los materiales de tuberías de 8 pulgadas. Los costos de bombeo para cada material alternativo de tuberías se calcularon utilizando la tasa de flujo. Los costos de energía para estas redes de 1000 millas de tuberías de 8 pulgadas con una velocidad promedio de 0,4 pies por segundo se muestran en la Figura 10.4.

La diferencia en el consumo de energía eléctrica entre tuberías de PVC y hierro dúctil en una red de 1000 millas podría alimentar cuatro hogares anualmente. El ahorro en electricidad alcanzado por tuberías de PVC en comparación con tuberías de polietileno de alta densidad alimentaría seis hogares cada año en base a un hogar promedio de los EE. UU. que utiliza 10.812 kWh/año.¹⁴⁵

A los fines de comparación, este estudio utilizó una tasa de flujo de 2 pies por segundo en lugar de la tasa de flujo promedio per cápita de 0,4 pies por segundo. Las discusiones con numerosos ingenieros de diseño, municipios y servicios públicos determinaron que una tasa de flujo de 2 pies por segundo es de uso común en el diseño de sistemas de aguas municipales. Aunque este número es mayor que los 0,4 pies por segundo indicados anteriormente, las tendencias para los diversos materiales son las mismas.

10.2 Impacto ecológico de baja monetización de tuberías de PVC

Cuando se toma en consideración el consumo de energía (MJ/100 pies) para los diferentes materiales de tuberías, se pueden establecer su impacto ecológico. Como se muestra en la Figura 10.5, las tuberías de PVC de 8 pulgadas tienen el menor consumo de energía del ciclo de vida total en comparación con productos equivalentes de polietileno de alta densidad o hierro dúctil. El polietileno de alta densidad tiene el mayor consumo total de energía durante una duración estimada de 100 años a unas 2,5 veces el consumo de tuberías de PVC, mientras que el consumo de tuberías de hierro dúctil es de 2,4 veces el de tuberías de PVC. El consumo total de energía del ciclo de vida se compone del consumo desde la cuna a la instalación para tuberías, así como de la energía de bombeo total utilizada durante un período de 100 años y las sustituciones de tuberías requeridas.

FIGURA 10.5 : ENERGÍA INCORPORADA TOTAL EN 100 AÑOS DE TUBERÍAS EQUIVALENTES DE PVC DR18 DE 8"

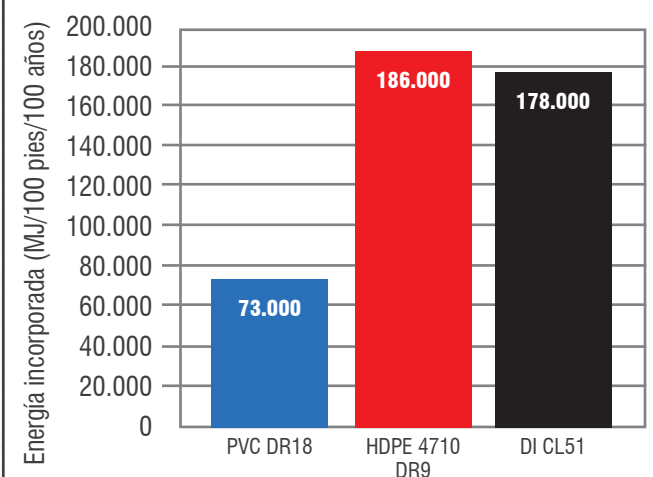
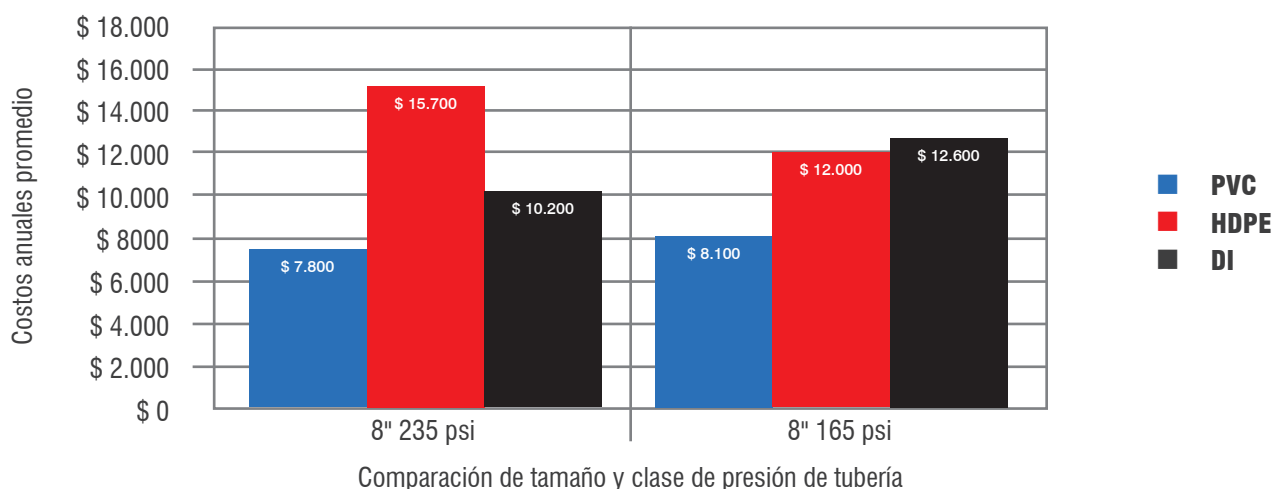


FIGURA 10.4: COMPARACIÓN DE LOS COSTOS PROMEDIO ANUALES DE ENERGÍA DE BOMBEO EN 100 AÑOS POR 1000 MILLAS DE TUBERÍA SOBRE LA BASE DE 0,4 PIES POR SEGUNDO DE VELOCIDAD



Nota: El gráfico supone la sustitución de tuberías de polietileno de alta densidad y hierro dúctil a los 50 años.

La Tabla 10.1 toma la producción desde la cuna a la instalación y la convierte en producción de carbono de tuberías de PVC y de hierro dúctil equivalentes. Como se muestra en la Figura 10.6, si la producción de carbono desde la cuna a la instalación se penalizara para tuberías de 8 pulgadas de PVC y hierro dúctil equivalentes a una longitud funcional de 100 pies, la tubería de PVC se clasificaría más bajo a USD 25 o USD 35 (dependiendo de la clase de presión) en comparación con tuberías de hierro dúctil a USD 225. Cada sustitución de tubería de hierro dúctil durante un período de 100 años requeriría el pago de una nueva penalización. Como se discutió previamente, las tuberías de hierro dúctil solo duran de 11 a 14 años en suelos moderadamente corrosivos y deben reemplazarse de 7 a 9 veces durante un período de 100 años. Esto significaría una penalización de carbono para las tuberías de hierro dúctil de USD 1.575 a USD 2.025 por cada 100 pies en 100 años, en comparación con las tuberías de PVC a USD 25 o USD 35. Las penalizaciones en 100 años por una milla de tuberías podrían ser de USD 83.160 a USD 106.920 para tuberías de hierro dúctil contra USD 1.320 o USD 1.848 para tuberías de PVC.

FIGURA 10.6 : COMPARACIÓN DE PRODUCCIÓN DE CARBONO MONETIZADA DE 100 PIES DE TUBERÍAS DE 8 PULGADAS

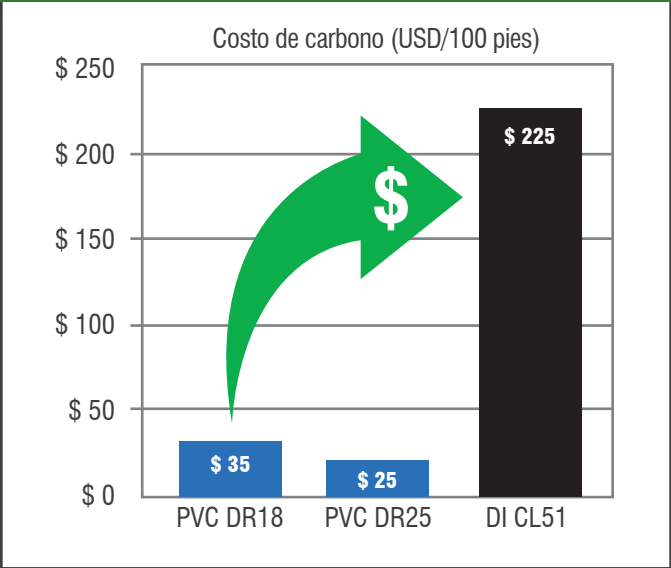


TABLA 10.1 : COMPARACIÓN DE PRODUCCIÓN DE CARBONO MONETIZADA DE MATERIALES DE TUBERÍAS POR 100 PIES DE TUBERÍAS DE 8"

Materiales de tuberías	GWP total (kg CO ₂ /100 pies)	Cuna a la puerta (kg CO ₂ /100 pies)	Distribución (kg CO ₂ /100 pies)	Instalación (kg CO ₂ /100 pies)	Costo total
8" PVC DR18	1.400	1.100	20	250	\$ 35
8" PVC DR25	1.000	700	15	250	\$ 25
DI de 8" CL51	9.000	8.600	61	300	\$ 225



11.0

NORMAS DE SUSTENTABILIDAD

62

Estados Unidos es el mayor consumidor de recursos naturales de la Tierra y utiliza aproximadamente el 20 % de la energía del mundo, 93 % de la cual es suministrada por recursos no renovables. En términos per cápita, EE. UU. es líder mundial en consumo de agua, con una porción sustancial de agua que se pierde o filtra por los sistemas de infraestructura. Debido a la disponibilidad de agua, las demandas en pugna de agua y el cambio de las condiciones hidrológicas, el Departamento de Interior de los EE. UU. prevé que se producirán múltiples conflictos por el agua en el oeste de Estados Unidos para el año 2025. La infraestructura sustentable del agua es vital para proporcionar al público estadounidense agua limpia y segura y ayudar a garantizar la salud ambiental, económica y social de las comunidades de la nación.

A medida que los municipios en los Estados Unidos y Canadá se centran en entregar agua limpia y sustentable, tratamiento de aguas residuales eficiente y escurrimiento controlado de aguas pluviales, las características y los costos apropiados de las tuberías son consideraciones esenciales. Los funcionarios del gobierno, los ingenieros y las empresas que instalan, operan y mantienen la infraestructura de tuberías de agua tienen que entender que un enfoque en los sistemas de ciclo de vida significa más que simplemente considerar el material de las tuberías. Significa utilizar el concepto del ciclo de vida para diseñar, instalar y operar los sistemas de agua de manera sustentable durante al menos 100 años.

11.1 Infraestructura sustentable y calificaciones

Los análisis del ciclo de vida ayudan a los fabricantes a entender todos los posibles efectos ambientales asociados a un producto. Junto con el análisis económico, esto se puede utilizar para hacer un producto más sustentable, y es una herramienta valiosa para las empresas de ingeniería, municipios y empresas de servicios públicos para ayudar a lograr los objetivos de sustentabilidad.

Muchos códigos y normas de construcción ahora hacen referencia a la utilización de un análisis del ciclo de vida como medio de selección de productos y materiales con menor efecto ambiental en comparación con las alternativas. Los códigos y las normas también utilizan análisis del ciclo de vida como medio para integrar el ciclo de vida en los proyectos de construcción e infraestructura.

11.1.1 Instituto de Infraestructura Sustentable (ISI, por sus siglas en inglés): Envision™

El Instituto de Infraestructura Sustentable desarrolló la norma Envision™, un sistema de calificación para evaluar, calificar y mejorar la sustentabilidad de los proyectos de infraestructura como los sistemas de distribución de agua potable, sistemas de alcantarillado y sistemas de aguas pluviales.

envision™



Hay varios créditos en la norma Envision™ relacionados con los efectos del ciclo de vida, incluso la reducción de la energía incorporada neta y las emisiones de gases de efecto invernadero en todo el ciclo de vida de un producto. Se puede utilizar un análisis del ciclo de vida para determinar los efectos de un producto o sistemas, así como determinar cualquier reducción en los efectos ambientales.

La norma Envision™ del Instituto de Infraestructura Sustentable también considera la reducción del consumo de energía durante la etapa de uso de un producto, por lo que el proyecto en su conjunto tendrá una contribución reducida al potencial calentamiento global y el cambio climático y tendrá menores costos de operación.

La Tabla 11.1 resume los créditos de la norma Envision™ del Instituto de Infraestructura Sustentable relativos al análisis del ciclo de vida.

Los funcionarios del gobierno, los ingenieros y las empresas que instalan, operan y mantienen la infraestructura de tuberías de agua tienen que entender que un enfoque en los sistemas de ciclo de vida significa más que simplemente considerar el material de las tuberías. Significa utilizar el concepto del ciclo de vida para diseñar, instalar y operar los sistemas de agua de manera sustentable durante al menos 100 años.

Los proyectos que buscan estos créditos para reducir la energía incorporada neta de los materiales deben entender primero la energía incorporada de los materiales. Luego, para tratar de reducir este efecto, los proyectos deben seleccionar no solo los materiales que tienen menos energía incorporada, sino los materiales que seguirán funcionando durante un período de tiempo mientras consumen, o causan de forma pasiva, un mínimo de energía. Mantener bajos requisitos de energía de bombeo ayuda a mantener bajas la energía y el impacto ecológico de los proyectos, lo que permite que los proyectos logren más fácilmente créditos Envision™ CR1.1 y RA2.1.

NSF International ha desarrollado una norma para la sustentabilidad de los productos en contacto con el agua.¹⁴⁶ Esta norma proporciona un marco coherente basado en la ciencia para comunicar información sobre los atributos sostenibles de los productos en contacto con el agua. El desarrollo de productos que tienen un efecto reducido sobre el medio ambiente y la sociedad se fomenta a través de esta norma. Dentro de este marco, las asociaciones de fabricantes y de la industria con datos publicados del análisis del ciclo de vida contribuyen a la obtención de puntos en esta norma, y se asignan puntos adicionales si se demuestra que los sistemas reducen el efecto ambiental en general.

Las normas LEED (Leadership for Energy and Environmental Design) han integrado créditos específicos para el análisis del ciclo de vida y la declaración ambiental de producto (DAP). Hay créditos piloto en LEED Versión 3 y créditos específicos en LEED Versión 4. Esta norma se centra estrictamente en los edificios y no proporciona créditos específicos para la infraestructura de tuberías de servicios públicos. Sin embargo, dependiendo del tamaño del proyecto y sus límites, pueden incluirse los sistemas de aguas pluviales y sistemas de aguas negras y agua potable del lugar.

TABLA 11.1 : CRÉDITOS ENVISION™ DEL INSTITUTO DE INFRAESTRUCTURA SUSTENTABLE CORRESPONDIENTES AL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

Envision™ del ISI	Intención	Medida
Asignación de recursos		
RA1.1: Reducir la energía incorporada neta	Conservar la energía mediante la reducción de la energía incorporada neta de los materiales del proyecto durante la vida del proyecto.	Porcentaje de reducción de la energía incorporada neta a partir de un análisis de la energía del ciclo vital.
RA1.2: Apoyar las prácticas de contratación sustentable	Obtener materiales y equipos de fabricantes y proveedores que implementan prácticas sustentables.	Porcentaje de materiales procedentes de fabricantes que cumplen con los requisitos de las prácticas sustentables.
RA2.1: Reducir el consumo energético	Conservar la energía mediante la reducción del funcionamiento global y el mantenimiento del consumo de energía durante todo el ciclo de vida del proyecto.	Porcentaje de reducciones alcanzadas.
Clima y riesgo		
CR1.1: Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero	Llevar a cabo un análisis completo del carbono en el ciclo de vida y utilizar esta evaluación para reducir la cantidad esperada de las emisiones netas de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida del proyecto para reducir la contribución del proyecto al cambio climático.	Emisiones netas de dióxido de carbono equivalente (CO ₂ eq) del ciclo de vida.

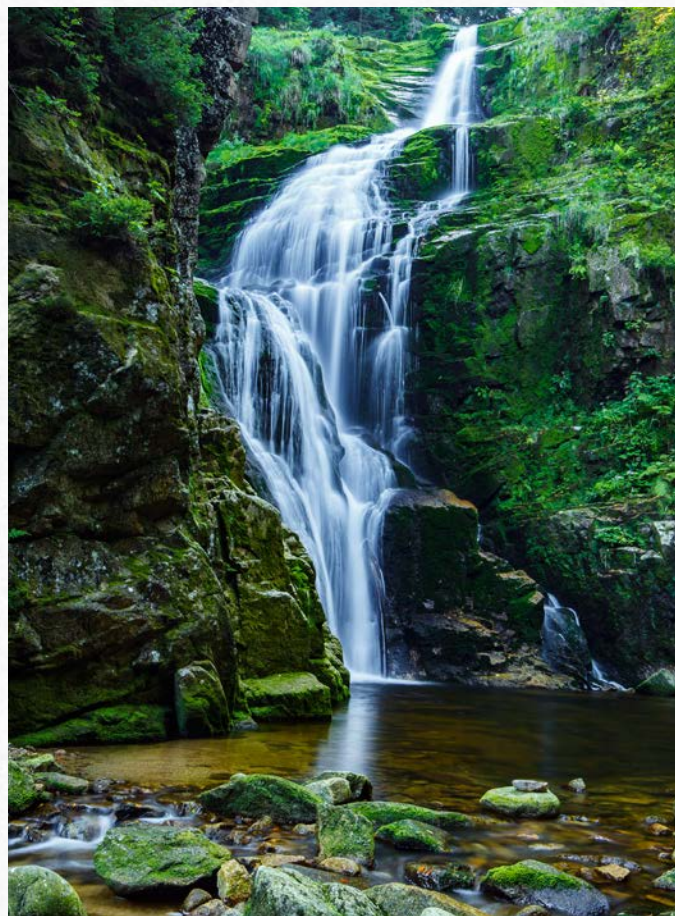
A medida que los municipios en los Estados Unidos y Canadá se centran en entregar agua limpia y sustentable, tratamiento de aguas residuales eficiente y escorrentía controlada de aguas pluviales, las características y los costos apropiados de las tuberías son consideraciones esenciales.



11.1.2 Certificación SMaRT

El Instituto para la Transformación del Mercado hacia la Sustentabilidad (MTS, por sus siglas en inglés) ha desarrollado un sistema de clasificación llamado certificación SMaRT. Varios grupos de la industria, incluida la Asociación de Investigación de Tuberías de Hierro Dúctil (DIPRA, por sus siglas en inglés) y el Instituto Nacional de Tuberías de Arcilla (NCPI, por sus siglas en inglés) han recibido esta certificación ambiental. La DIPRA no ha dado a conocer los resultados de la evaluación del ciclo de vida de las tuberías de hierro dúctil, aunque es un requisito de la certificación SMaRT. Esto claramente no es transparente y no parece cumplir con los requisitos de las normas ISO correspondientes. Los siguientes artículos critican la certificación SMaRT para tuberías de hierro dúctil:

- ▶ *No se describe ninguna información ambiental sobre el producto.* La norma ISO 14025, Artículo 7.2.1, requiere la presentación de un análisis del efecto del ciclo de vida, un inventario del ciclo de vida y un módulo de información; sin embargo, nada de esta información se presentó en la certificación SMaRT de la DIPRA.
- ▶ *El programa SMaRT no permite la comparabilidad.* La norma ISO 14025, Artículo 5.6, pretende que las declaraciones ambientales permitan al usuario comparar el rendimiento ambiental de los productos sobre una base de ciclo de vida; sin embargo, como no se informan efectos sobre una base de ciclo de vida, los productos solo pueden compararse en el nivel de certificación y el total de puntos alcanzados, que no es transparente.
- ▶ *La normal de categoría del producto (PCR, por sus siglas en inglés) SMaRT no representa un producto, una categoría o una función específicos del producto,* como lo requieren las normas ISO 14025, Artículo 6.2, e ISO 14025, Artículo 6.7.2b. De hecho, la norma de categoría del producto SMaRT establece: “La categoría y la definición de producto son para todos los productos que no sean aviones y vehículos. La categoría de producto incluye todos los productos de construcción. El alcance de SMaRT es idéntico a esta categoría y definición. (SMaRT Artículo 2) (ISO 21930 Artículos 6.21(a) y 6.22)”. Sin definiciones apropiadas para las categorías y funciones específicas del producto o por no hacer uso de reglas de categoría del producto existentes que han sido objeto de comentarios públicos, no pueden determinarse y compararse los verdaderos efectos ambientales de un sistema de productos.
- ▶ *SMaRT excluye ciertos tipos de materiales,* que van directamente contra la norma ISO 14025, Artículo 6.2: “El alcance del programa deberá ser claro y debe definir si el programa es limitado, por ejemplo, a una zona geográfica determinada o para determinados sectores, productos o grupos de productos industriales. Un programa debe ser accesible a todas las organizaciones interesadas en desarrollar una norma de categoría del producto o declaraciones ambientales de Tipo III dentro del alcance definido”. Como este programa no certifica los productos de PVC, no es accesible a todos los materiales o industrias.
- ▶ *No se divulgaron datos sobre el efecto del ciclo de vida.* La norma ISO 14025, Artículo 6.8.2, requiere que se incluya información ambiental cuantificada basada en un análisis del ciclo de vida. Un principio rector de productos más ecológicos es la transparencia



y los clientes no deben aceptar nada menos que una divulgación completa de los efectos ambientales del ciclo de vida de un producto que dice ser “ecológico”.

- ▶ *Los requisitos previos de la certificación SMaRT exigen que no se produzcan emisiones de sustancias químicas tóxicas del Tratado de Estocolmo en la fabricación, venta, reutilización y al final de la vida del producto.* Debido a este requisito previo, la certificación SMaRT prohíbe explícitamente el PVC¹⁴⁷, ya que en la producción de resina de PVC se liberan emisiones de dioxina. Sin embargo, como se muestra en este estudio, una revisión del Inventario de Emisiones Tóxicas de la EPA muestra emisiones registradas de dioxina y otras sustancias químicas tóxicas, como el plomo y el mercurio, de las instalaciones de fabricación de hierro dúctil, mientras que los fabricantes de tuberías de PVC no están informando emisiones de sustancias químicas tóxicas de sus instalaciones de fabricación.

Además, el Instituto para la Transformación del Mercado hacia la Sustentabilidad está llamando ahora la certificación SMaRT una “Declaración de Producto Ambiental/Producto de Salud”. Una Declaración de Producto de Salud (HPD, por sus siglas en inglés), según HPD Collaborative, “define de manera objetiva la información crítica necesaria para apoyar la divulgación exacta de la cadena por parte de los fabricantes y proveedores, y las decisiones informadas por parte de los diseñadores de construcción, contratistas, propietarios y usuarios”. La norma HPD requiere que la divulgación de cada ingrediente de riesgo sanitario en un producto sea completa. No se informan riesgos sanitarios a través de la certificación SMaRT; por lo tanto, no se ajusta a la norma de Declaración de Producto de Salud establecida por HPD Collaborative.

12.0

RESUMEN DE LAS CONCLUSIONES - ENERGÍA INCORPORADA Y SUSTENTABILIDAD

12.1 Resumen de conclusiones para comparaciones totales de energía incorporada en 100 años para tuberías de presión y por gravedad

Este análisis del ciclo de vida de tuberías de PVC para agua y alcantarillado y análisis de sustentabilidad comparativa de materiales de tuberías ha demostrado que las tuberías de PVC de presión y por gravedad tienen la energía incorporada más baja de la mayoría de los materiales alternativos de tuberías. La energía incorporada total para tuberías incluye energía de la cuna a la puerta, transporte, instalación, etapa de uso y al final de la vida útil. Para este estudio, se usó una duración estimada del sistema de 100 años para comparar la mayoría de los materiales alternativos de tuberías. La energía incorporada de la cuna a la puerta se compone de lo siguiente: energía utilizada para materias primas, la fabricación y el embalaje. La energía incorporada para el transporte y la instalación incluye la energía para el transporte de la tubería desde la planta de fabricación al lugar de trabajo y su instalación con cualquier protección contra la corrosión. La fase de

uso incluye 100 años de energía hidráulica y pérdida de agua en 100 años. Cuando las tuberías se reemplazan durante los 100 años de duración estimada del sistema, la energía consumida durante la cuna a la puerta, el transporte y la instalación de la tubería de sustitución se incluye en los cálculos totales de energía incorporada. No se consideró la energía incorporada del fin de la vida útil ya que las tuberías rara vez se retiran al final de su vida.

65

12.1.1 Comparaciones de energía incorporada total de tuberías de presión

La Figura 12.1 compara tuberías de 8 pulgadas de PVC, polietileno de alta densidad y hierro dúctil con una clase de presión en PVC DR18 PC235 o equivalente. Como se muestra, la energía incorporada total en 100 años para tuberías de PVC es un 61 % menor que para tuberías de polietileno de alta densidad y un 59 % menor que para tuberías de hierro dúctil.

FIGURA 12.1 : ENERGÍA INCORPORADA TOTAL EN 100 AÑOS PARA TUBERÍAS DE PRESIÓN DE 8" DE PVC DR18 EQUIVALENTES

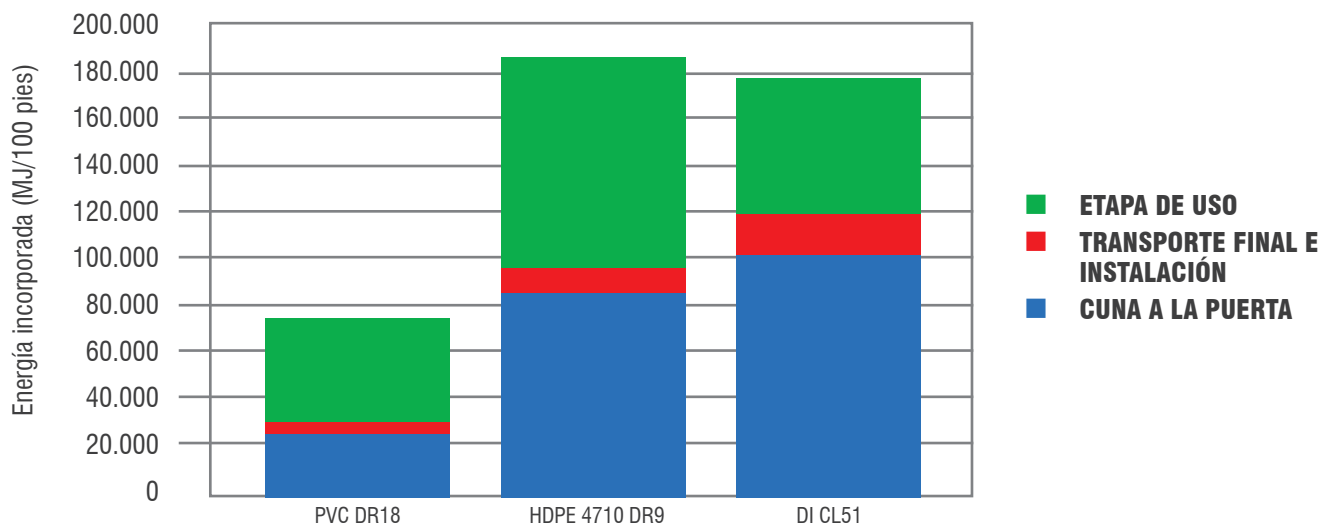
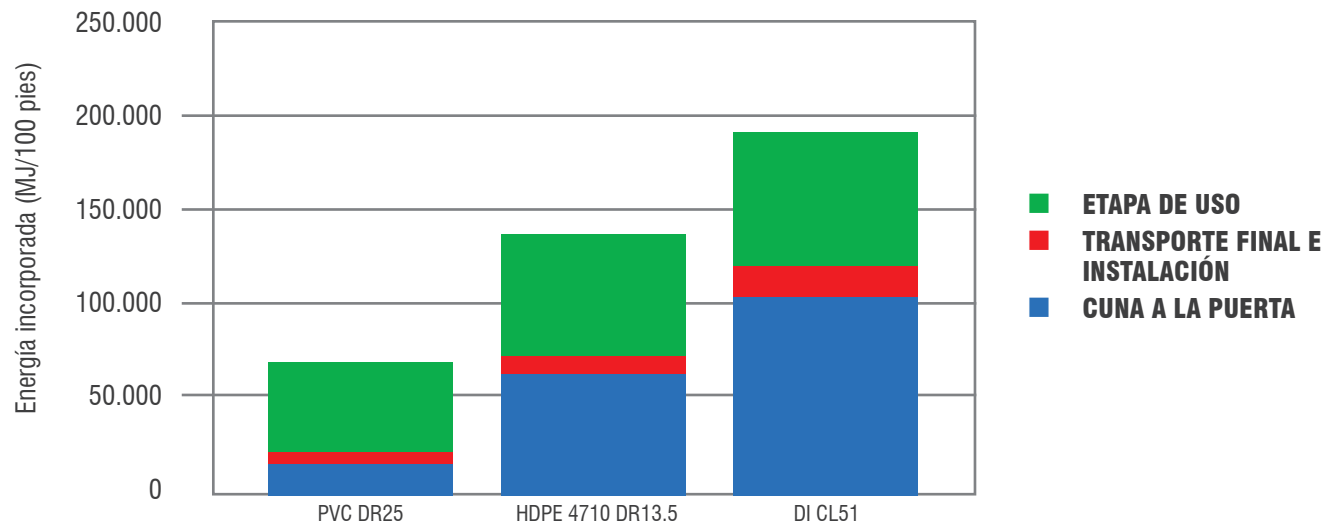


FIGURA 12.2 : ENERGÍA INCORPORADA TOTAL EN 100 AÑOS PARA TUBERÍAS DE PRESIÓN DE 8" DE PVC DR25 EQUIVALENTES

La Figura 12.2 compara tuberías de 8 pulgadas de PVC, polietileno de alta densidad y hierro dúctil con una clase de presión en PVC DR25 PC165 o equivalente. Como se demostró, la energía incorporada total en 100 años para tuberías de PVC es un 52 % menor que para tuberías de polietileno de alta densidad y un 56 % menor que para tuberías de hierro dúctil.

La Figura 12.3 compara tuberías de 24 pulgadas de PVC, polietileno de alta densidad y hierro dúctil con una clase de presión en PVC DR25 PC165 o equivalente. Como se demostró, la energía incorporada total en 100 años para tuberías de PVC es un 61 % menor que para tuberías de polietileno de alta densidad, un 56 % menor que para tuberías de hierro dúctil y un 17 % menor que para tuberías de concreto pretensado.

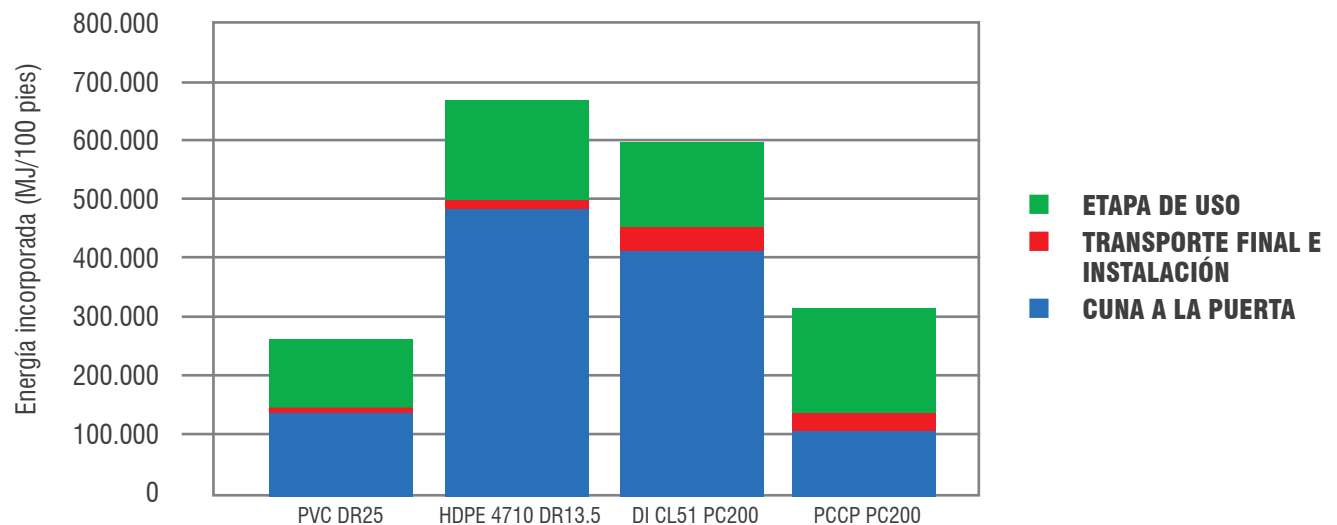
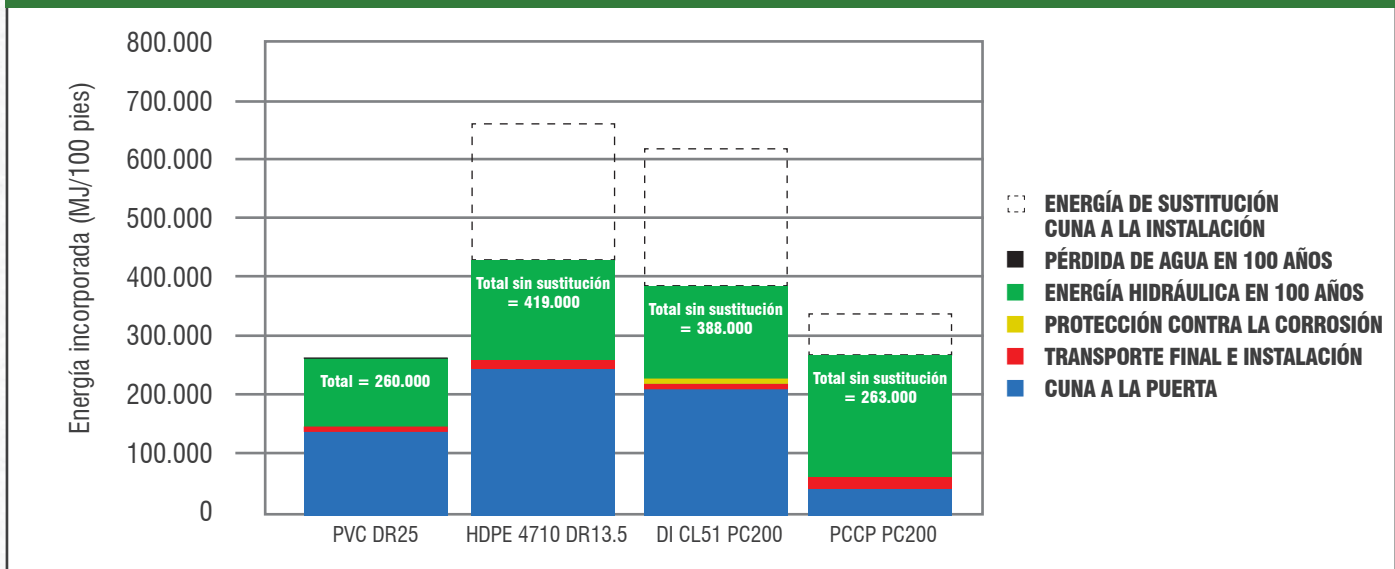
FIGURA 12.3 : ENERGÍA INCORPORADA TOTAL EN 100 AÑOS PARA TUBERÍAS DE PRESIÓN DE 24" DE PVC DR25 EQUIVALENTES

FIGURA 12.4: ENERGÍA INCORPORADA TOTAL EN 100 AÑOS PARA TUBERÍAS DE PRESIÓN DE 24" DE PVC DR25 EQUIVALENTES (ENERGÍA HIDRÁULICA SIN SUSTITUCIÓN)

Los fabricantes de tuberías de presión de polietileno de alta densidad, hierro dúctil y concreto pretensado pueden afirmar que sus tuberías no deben reemplazarse durante los 100 años de duración estimada del sistema y que este estudio representa injustamente sus productos. Sin embargo, este estudio ha demostrado que estas tuberías necesitan sustitución dentro de los 50 años. Además, incluso sin sustitución, los materiales de estas tuberías todavía tienen mayor energía incorporada total luego de los 100 años que las tuberías de PVC.

La Figura 12.4 destaca las diferencias en energía incorporada en 100 años entre las tuberías de presión de 24 pulgadas con exclusión de la energía de la cuna a la instalación necesaria para la sustitución de tuberías de polietileno de alta densidad, hierro dúctil y concreto pretensado (bar discontinuo) durante el ciclo de vida de 100 años. Esta figura representa el continuo deterioro de las paredes interiores de las tuberías después del momento programado de las sustituciones. La Figura 12.4 demuestra que, sin sustituciones, las tuberías de polietileno de alta densidad habrían tenido mayor energía incorporada total en 100 años que las tuberías de PVC. Sin sus sustituciones necesarias durante el ciclo de vida, las tuberías de polietileno de alta densidad habrían tenido un 38 % más, las tuberías de hierro dúctil habrían tenido un 33 % más y las tuberías de concreto pretensado habrían tenido un 1 % más de energía incorporada en 100 años que las tuberías de PVC.

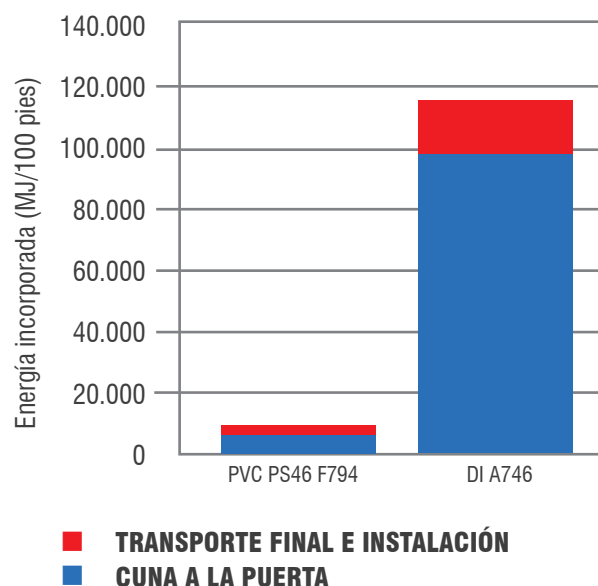
12.1.2 Comparaciones de energía incorporada total de tuberías por gravedad

La energía incorporada total en 100 años para las comparaciones de tuberías por gravedad incluye la energía de la cuna a la puerta, el transporte y la instalación y la energía adicional para la sustitución de tuberías con una vida útil menor a 100 años. Para tuberías por gravedad no se calcula la energía de etapa de uso, porque no se requiere electricidad para mover fluidos a través de ellas y la energía asociada con las actividades de mantenimiento y el flujo de infiltración de tratamiento es difícil de cuantificar. La infiltración por fugas en las tuberías es un costo significativo y multiplicador de energía en la planta de tratamiento de aguas residuales. Las tuberías de hierro dúctil y de concreto son susceptibles a la corrosión de los gases de alcantarillado, mientras que las tuberías de arcilla son propensas al agrietamiento. La corrosión y el agrietamiento de las tuberías permiten que las aguas residuales filtren, lo cual puede ser dañino para el medioambiente. La corrosión y el agrietamiento de las tuberías también permite que el agua del suelo ingrese en las líneas de alcantarillado, lo cual aumenta innecesariamente la energía de la bomba y el uso de productos químicos en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Las tuberías de polietileno de alta densidad y de polipropileno también son propensas a presentar fugas debido a problemas de deflexión y deformación por fluencia.^{148 149}

Las tuberías de PVC no son propensas a corrosión por los gases de alcantarillado y las juntas de las tuberías de PVC no presentan fugas, eliminando así cualquier problema causado por la infiltración o exfiltración. Si los costos de energía y operaciones asociados con la infiltración se añadieran a las tablas a continuación, las tuberías de PVC para alcantarillado demostrarían ser aún más sustentables que los materiales alternativos de tuberías.

La Figura 12.5 compara tuberías de perfil de pared de PVC PS46 F794 de 8 pulgadas y tuberías equivalentes por gravedad de hierro dúctil.

FIGURA 12.5 : ENERGÍA INCORPORADA TOTAL EN 100 AÑOS PARA TUBERÍAS POR GRAVEDAD EQUIVALENTES DE PVC PS46 F794 DE 8" PARA PERFIL DE PARED



La energía incorporada total en 100 años para tuberías de PVC es un 91 % menor que para tuberías equivalentes para alcantarillado de hierro dúctil.

La Figura 12.6 compara tuberías por gravedad de PVC de pared sólida, de hierro dúctil y de arcilla vitrificada de 8 pulgadas con tuberías de pared sólida de PVC PS46 D3034. La energía incorporada total en 100 años para tuberías de alcantarillado de PVC es un 88 % menor que para tuberías equivalentes para alcantarillado de hierro dúctil y un 64 % menor que para tuberías de arcilla vitrificada.

FIGURA 12.6 : ENERGÍA INCORPORADA TOTAL EN 100 AÑOS PARA TUBERÍAS POR GRAVEDAD EQUIVALENTES DE PARED SÓLIDA DE PVC PS46 D3034 DE 8"

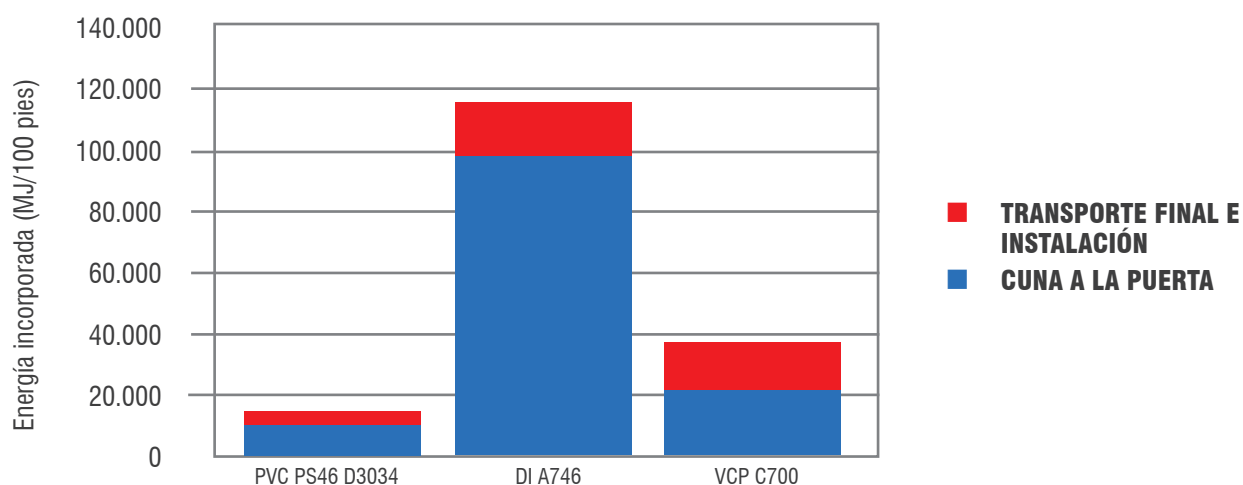
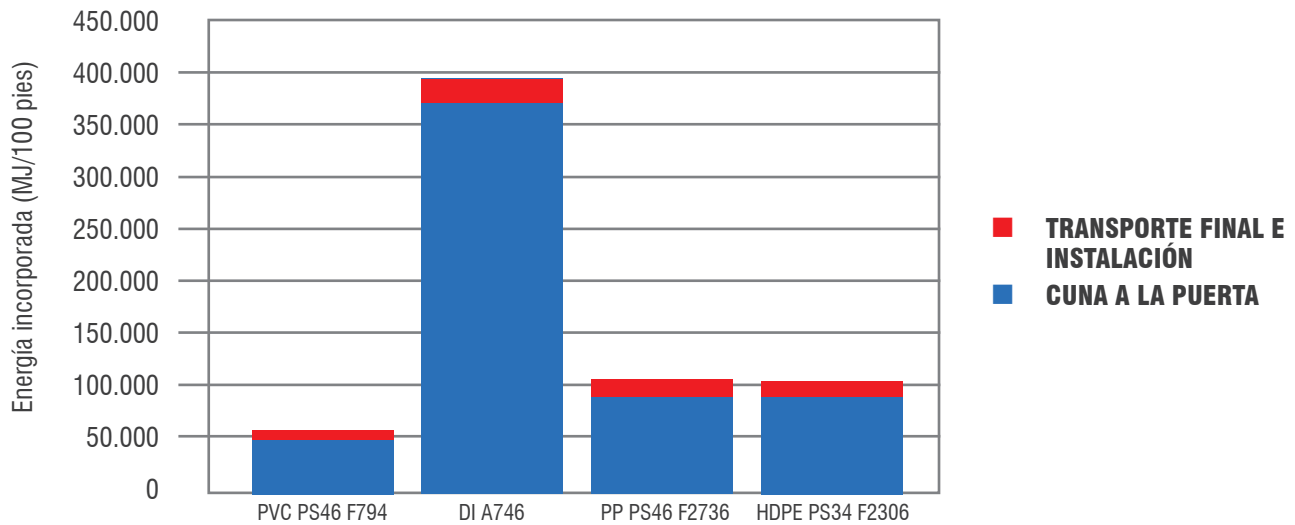


FIGURA 12.7 : ENERGÍA INCORPORADA TOTAL EN 100 AÑOS PARA TUBERÍAS POR GRAVEDAD EQUIVALENTES DE PVC PS46 F794 DE 24" PARA PERFIL DE PARED

La Figura 12.7 compara tuberías de perfil de pared de PVC, de hierro dúctil, de polipropileno y de polietileno de alta densidad de 24 pulgadas equivalentes con tuberías de perfil de pared de PVC PS46 F794. La energía incorporada total en 100 años para tuberías de alcantarillado de PVC es un 85 % menor que para tuberías equivalentes para alcantarillado de hierro dúctil y un 44 % menor que para tuberías de polipropileno y un 43 % menor que para tuberías de polietileno de alta densidad. Cabe señalar que las tuberías equivalentes de alcantarillado de polietileno de alta densidad tienen una rigidez de tubería que es un 26 % menor que la rigidez de la tubería de PVC.

La Figura 12.8 compara tuberías de PVC de pared sólida, de hierro dúctil, de arcilla vitrificada y de concreto no reforzado de 24 pulgadas con tuberías de pared sólida de PVC PS46 F679. La energía incorporada total en 100 años para tuberías de alcantarillado de PVC es más que un 73 % menor que para tuberías equivalentes para alcantarillado de hierro dúctil y un 44 % menor que para tuberías de arcilla vitrificada.

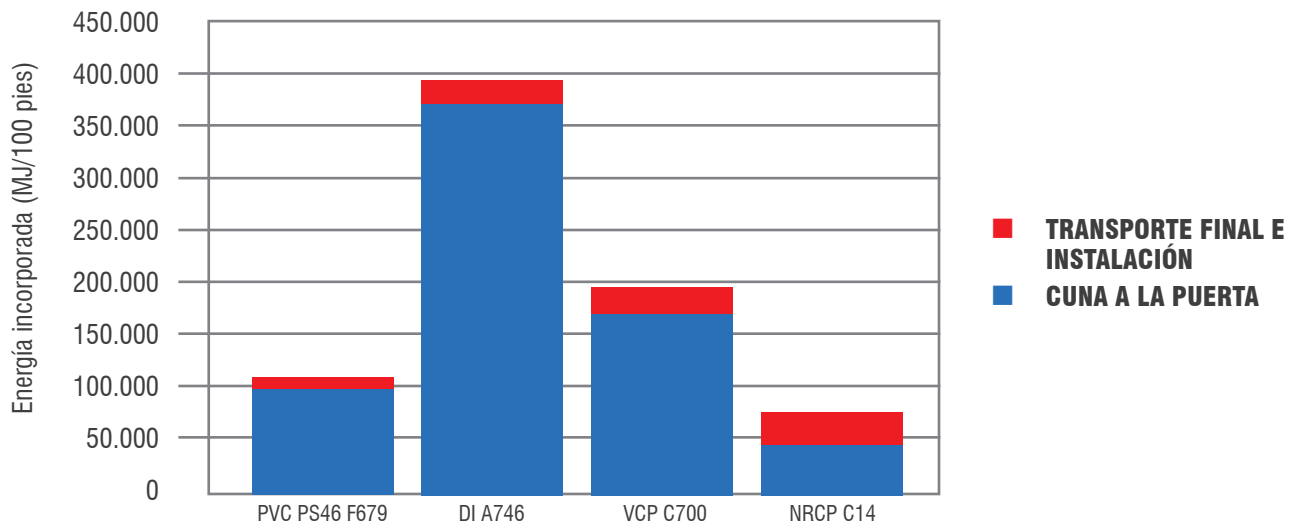
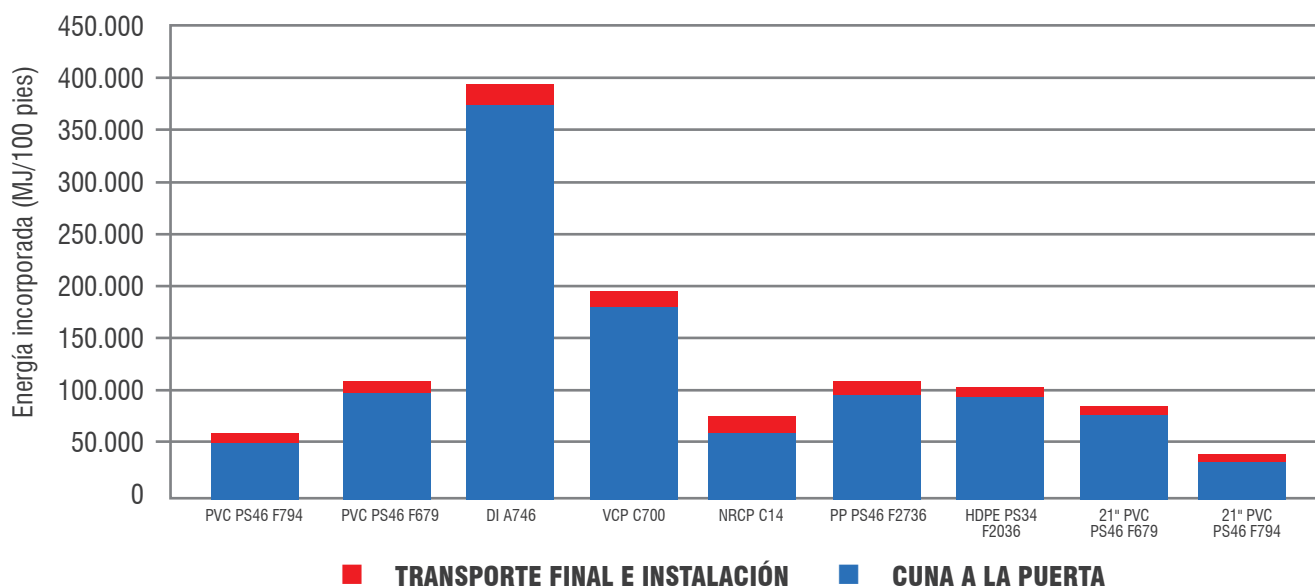
FIGURA 12.8 : ENERGÍA INCORPORADA TOTAL EN 100 AÑOS PARA TUBERÍAS POR GRAVEDAD EQUIVALENTES DE PARED SÓLIDA DE PVC PS46 F679 DE 24"

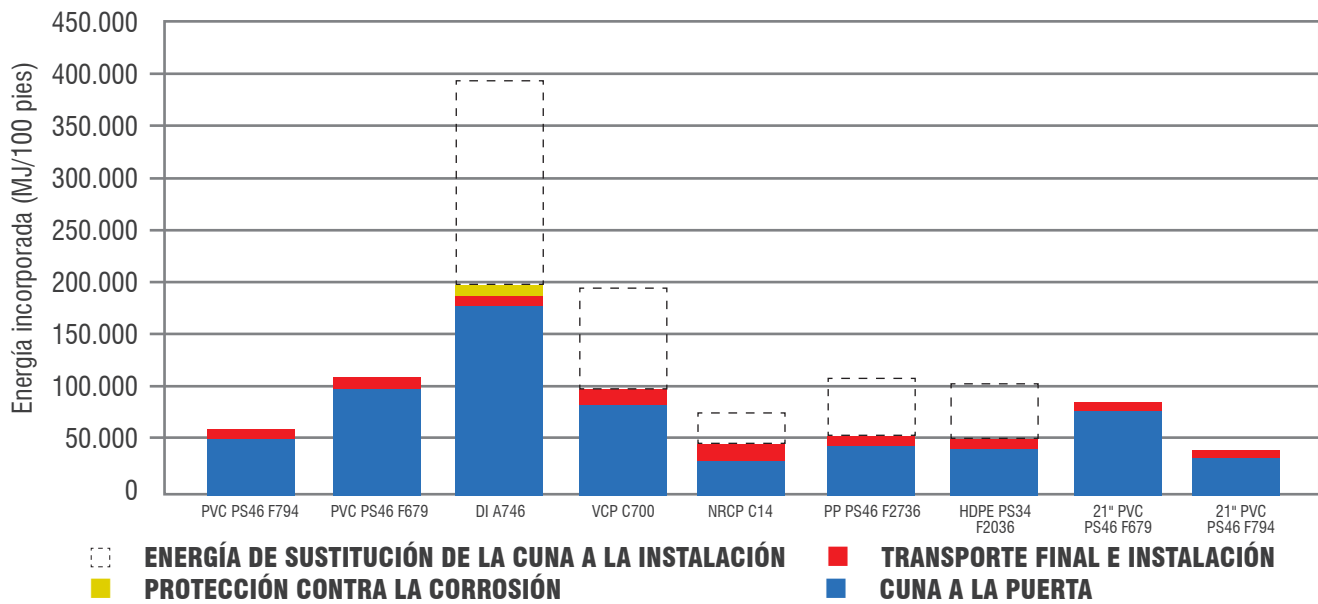
FIGURA 12.9 : ENERGÍA INCORPORADA TOTAL EN 100 AÑOS PARA TUBERÍAS POR GRAVEDAD EQUIVALENTES DE PVC PS46 DE 24" DE PARED SÓLIDA PARA PERFIL DE PARED



Las tuberías de PVC tienen mayor energía incorporada en comparación con tuberías de concreto no reforzado, pero las tuberías de concreto no reforzado son altamente susceptibles al deterioro de los gases producidos por las aguas residuales. Debido a este deterioro, las tuberías de concreto no reforzado probablemente deban reemplazarse dos o más veces durante una duración estimada de 100 años para el sistema de tuberías. La corrosión de la pared de la tubería también llevaría a una mayor infiltración y el posible colapso de la tubería. El aumento de la infiltración aumenta significativamente los requisitos de energía y los costos de un sistema de aguas residuales. Un colapso de la tubería no solo exige grandes costos de reparación, sino que podría causar contaminación ambiental significativa y poner en peligro la seguridad del público al socavar la estructura de soporte de edificios y carreteras construidos cerca de las líneas de alcantarillado.

La Figura 12.9 resume el total de los valores de energía incorporada en 100 años para alternativas de tuberías de pared sólida y perfil de pared de 24 pulgadas. Esta figura incluye la adición de tuberías de pared sólida y perfil de pared de PVC de 21 pulgadas que han demostrado tener una capacidad de flujo equivalente a las tuberías de hierro dúctil, arcilla vitrificada, concreto no reforzado, polipropileno y polietileno de alta densidad de 24 pulgadas en la Tabla A.8 del Apéndice. Las tuberías de PVC con la misma o mayor capacidad de carga tienen igual o mejor energía incorporada total en 100 años que las tuberías competitivas.



FIGURA 12.10 : ENERGÍA INCORPORADA TOTAL EN 100 AÑOS PARA TUBERÍAS POR GRAVEDAD EQUIVALENTES DE PVC PS46 DE 24" DE PARED SÓLIDA PARA PERFIL DE PARED

Con el fin de ser transparente, la Figura 12.10 destaca las diferencias en energía incorporada entre las tuberías por gravedad de 24 pulgadas sin las sustituciones necesarias durante la vida útil prevista de 100 años. El examen de la Figura 12.10 revela que las tuberías de hierro dúctil, arcilla vitrificada, polipropileno y polietileno de alta densidad de 24 pulgadas tienen energía incorporada en 100 años mayor o equivalente a las tuberías de PVC, incluso cuando no se consideran las energías incorporadas de sustituciones.

El diseño de la tubería por gravedad debe estar basado en la capacidad de transporte de flujo, que es una función del diámetro interior y la rugosidad de la tubería. Los cálculos muestran que en una pendiente común, las tuberías de PVC de 21 pulgadas tienen capacidad igual o mayor que las tuberías de 24 pulgadas de materiales alternativos. La energía incorporada total en 100 años para las alternativas de PVC de 21 pulgadas ofrecen una ventaja aún mayor por sobre las tuberías competitivas.

No es realista considerar el uso de tuberías de materiales alternativos sin prever al menos una sustitución durante el ciclo de vida de 100 años. Problemas con fugas, corrosión, fragilidad o deformación por fluencia pueden limitar la viabilidad económica de operar estas tuberías más allá de un cierto punto. La susceptibilidad a la corrosión interna y externa en un entorno de alcantarillado sanitario de las tuberías de hierro dúctil y concreto no reforzado exigirá que se considere más de una sustitución durante una duración estimada

de 100 años. Los problemas de fragilidad y de juntas con las tuberías de arcilla vitrificada y de deformación por fluencia y deflexión con las tuberías de polipropileno y polietileno de alta densidad limitan la vida útil de los productos, lo que requiere al menos una sustitución durante la vida útil de 100 años. Un factor importante que no se incluyó en los valores de energía incorporada de sustituciones mostrados en la Figura 12.10 es la energía incorporada asociada con la rehabilitación de la superficie, la reconstrucción de carreteras, los materiales de pavimentación y las demoras de tránsito causadas por la reconstrucción. Esos factores podrían fácilmente duplicar los valores de energía incorporada de las sustituciones. Las tuberías de PVC con una vida útil de más de 100 años tendrían una ventaja aún mayor si se consideraran los valores adicionales de energía incorporada de las sustituciones.

Este informe demuestra las ventajas de la energía incorporada y de la sustentabilidad en los sistemas de tuberías de presión y por gravedad de PVC. Los servicios públicos que consideran la sustentabilidad, el impacto en la energía incorporada total y los efectos de los gases de efecto invernadero en el medioambiente deberían seleccionar tuberías de PVC para sus proyectos nuevos y de sustitución. Las tuberías de PVC también deberían ser la opción más clara para los proyectos en los que los servicios públicos consideran los efectos totales ambientales del ciclo de vida y económicos para los materiales de las tuberías.

CONCLUSIONES

Los diseñadores, compradores y operadores de sistemas de agua que son responsables de la reducción de los costos operativos y el impacto ambiental deben mirar los resultados verificados del análisis del ciclo de vida y la declaración ambiental de producto como puntos de referencia objetivos de desempeño ambiental.

13.1 Resumen de los resultados y las conclusiones del análisis del ciclo de vida

A continuación se presentan algunos de los principales resultados y conclusiones del *análisis del ciclo de vida de tuberías de PVC y el análisis comparativo de sustentabilidad de materiales de tuberías*:

- ▶ Las tuberías de PVC tienen un impacto ecológico más bajo en comparación con la mayoría de otras tuberías para aplicaciones de tuberías de presión y por gravedad.
- ▶ Las tuberías de PVC no emiten ni filtran sustancias tóxicas en su fabricación o en su conducción de agua.
- ▶ Las tuberías de PVC no se corroen interna o externamente ni requieren aditivos químicos para inhibir la corrosión.
- ▶ Las tuberías de PVC proporcionan ahorro de energía de bombeo a largo plazo debido a la resistencia a la corrosión, paredes lisas y gran zona de transporte.
- ▶ Las tuberías por gravedad de PVC tienen una mayor capacidad que otros materiales debido a sus paredes lisas, la resistencia a la abrasión, la resistencia a la infiltración y la falta de corrosión.
- ▶ Las tuberías de PVC tienen una vida útil de más de 100 años, verificada por numerosos estudios y descubrimientos.
- ▶ Las tuberías por gravedad de PVC tienen la energía incorporada más baja para un ciclo de vida de 100 años y no necesitan sustituciones ni protección contra la infiltración o la corrosión en comparación con otros materiales.
- ▶ Las tuberías por presión de PVC tienen la energía incorporada más baja para un ciclo de vida de 100 años y no necesitan sustituciones ni protección contra la corrosión, consumen menos energía de bombeo y presentan menos roturas de tuberías principales en comparación con otros materiales.
- ▶ Las tuberías de PVC permiten reducir el impacto ecológico de los sistemas de distribución de agua debido a las bajas energías incorporadas y de bombeo requeridas.
- ▶ Las tuberías de presión de PVC tienen los costos de bombeo anuales y de ciclo de vida más bajos que cualquier material de tuberías.

- ▶ Las tuberías de presión y por gravedad de PVC tienen los más bajos costos de ciclo de vida debido a sus bajos costos de instalación y operación y no requieren financiación de capital para sustituciones.
- ▶ Las tuberías de PVC son completamente reciclables, pero su durabilidad ha evitado que la mayoría ingrese en la corriente de reciclaje.
- ▶ En general, se puede utilizar una tubería por gravedad de PVC de diámetro más pequeño para transportar una cantidad igual de flujo que las tuberías competitivas de mayor tamaño. Esta disminución en el material resulta en un menor efecto en el ciclo de vida.

La mayoría de los efectos ambientales se encuentran dentro de la extracción y procesamiento de materias primas requeridos para la fabricación de resina de PVC y la instalación de tuberías en el suelo. Las fábricas de tuberías de PVC causan comparativamente poco efecto. A partir de los ingredientes de la mezcla de alimentación, la resina de PVC es responsable de la mayoría de los efectos ambientales y el uso de los recursos, aunque también se encontró que los aditivos tienen un efecto significativo. Durante la instalación de tuberías, el combustible consumido durante la operación de la excavadora es responsable del efecto significativo.¹⁵⁰ El uso de una excavadora es común a todas las operaciones de instalación de tuberías, independientemente del material de la tubería.

Durante la etapa de uso de la tubería de presión, las bombas superan la pérdida de fricción y de elevación para mover el agua a través de la tubería; esto suele contribuir al mayor de los efectos generales en el ciclo de vida de las tuberías de PVC de agua potable. Este estudio demuestra que en comparación con otros materiales de tuberías durante la etapa de uso, los atributos del PVC reducen el componente de pérdida de fricción del uso de energía y los efectos ambientales resultantes. En segundo lugar en la etapa de uso, y para tuberías de alcantarillado y aguas pluviales sin presión, la etapa de la cuna a la puerta es generalmente la fuente principal de los efectos ambientales.

Con base en los resultados de este estudio, las tuberías de PVC proporcionan una ventaja competitiva ambiental y económica para su uso en una variedad de proyectos de infraestructura de agua y alcantarillado, incluso ventajas de costos de ciclo de vida y la oportunidad de reducir sustancialmente los gases de efecto invernadero en comparación con otros materiales. Las tuberías de PVC satisfacen los requisitos de accesibilidad y permiten a las comunidades trabajar en el cumplimiento de sus objetivos de infraestructura sustentable debido a su durabilidad, la baja tasa de ruptura, la resistencia a la corrosión y un rendimiento duradero.

APÉNDICE

Este Apéndice documenta la metodología de cálculo utilizada en todo el informe. También se proporciona información adicional sobre corrosión y calidad del agua. Para las selecciones de tuberías utilizadas en este estudio, se describen dimensiones, pesos, hidráulica y parámetros de energía incorporada.

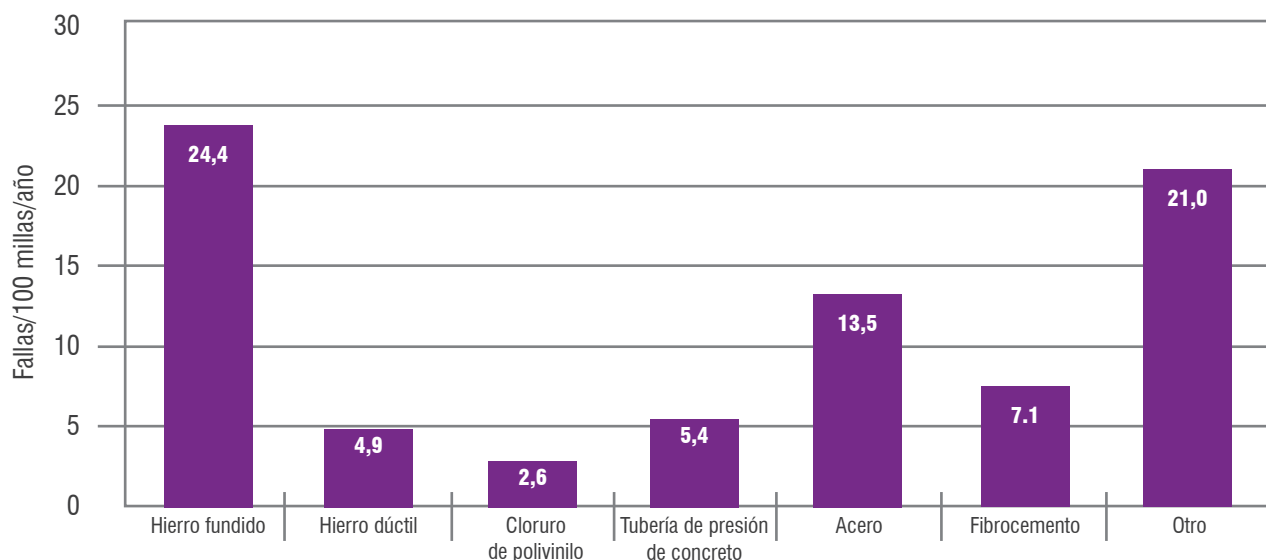
TUBERÍA DE PRESIÓN

► Roturas de tuberías principales

Las roturas de tuberías principales para agua pueden ser un desperdicio, peligrosas y costosas de reparar. Las tuberías de PVC utilizadas en la distribución de agua tienen tasas de roturas sustancialmente menores que otros materiales. Un estudio muestra que las tuberías de PVC tienen una tasa promedio de 2,6 roturas por 100 millas por año, frente a 24,4 roturas para las tuberías de hierro fundido y 4,9 roturas para las tuberías de hierro dúctil como se muestra en la figura A.1.¹⁵¹ El mismo

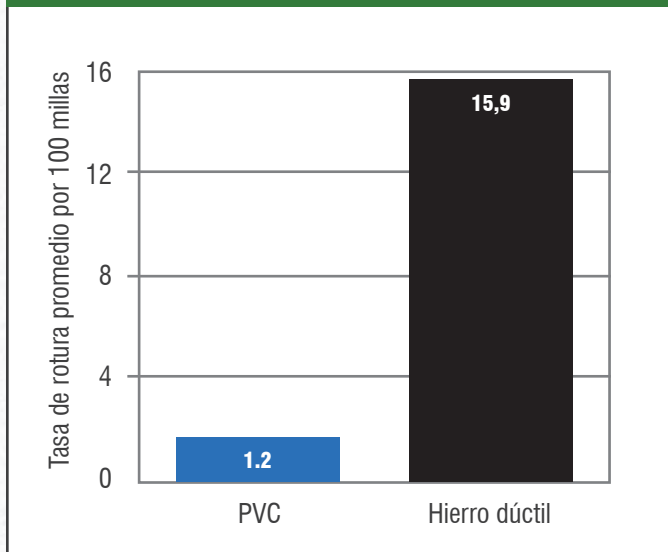
estudio muestra que para Canadá, las cifras comparables fueron de 0,7 roturas por 100 millas por año para tuberías de PVC frente a 35 para tuberías de hierro fundido y 15,2 para tuberías de hierro dúctil. Un estudio realizado por el Consejo Nacional de Investigación (NRC, por sus siglas en inglés) de Canadá informó que las tasas históricas de roturas por cada 100 millas de tuberías de hierro dúctil eran de 15,87. Las tuberías de PVC exhibieron solo 1,17 roturas por 100 millas de tubería. El informe del NRC mostró que las tuberías de hierro dúctil tenían 13,57 veces más roturas que las tuberías de PVC. Esta diferencia en tasas de rotura resulta en diferencias significativas de costos de reparación para tuberías de PVC y hierro dúctil, como se muestra en la Figura A.2. Investigación posterior en 1992 confirmó 14,9 roturas por cada 100 millas de tuberías de hierro dúctil y solo 1,45 en tuberías de PVC. En 1993, datos adicionales informaron que las tuberías de hierro dúctil tenían 15,7 roturas por 100 millas, mientras que las tuberías de PVC tenían 0,8 roturas por 100 millas.¹⁵²

FIGURA A.1 : TASAS DE FALLAS DE CADA MATERIAL DE TUBERÍAS POR 100 MILLAS EN UN PERÍODO DE UN AÑO



Fuente: Folkman, S. "Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study" (Tasas de roturas de tuberías principales de agua en los EE. UU. y Canadá: un estudio integral). Laboratorio de Estructuras Enterradas de la Universidad Estatal de Utah. Abril de 2012.

FIGURA A.2 : TASAS DE ROTURAS DE TUBERÍAS DE PVC Y DE HIERRO DÚCTIL EN CANADÁ SEGÚN EL CONSEJO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN



Un estudio del Laboratorio de Estructuras Enterradas de la Universidad Estatal de Utah descubrió que:¹⁵³

- ▶ La edad promedio de una tubería fallida en los EE. UU. y Canadá es de 47 años.
- ▶ La causa del fallo de la tubería depende del material de la tubería.
- ▶ La corrosión no causa fallos en tuberías de PVC.
- ▶ Los fallos en tuberías de PVC se reducen con el tiempo.
- ▶ Los fallos en tuberías de hierro dúctil aumentan con el tiempo debido a la corrosión.

“Las tasas de fallo están influenciadas por varios factores como las condiciones del suelo, la profundidad de la instalación, las cargas internas (la presión de funcionamiento y de sobrecarga), cargas externas (tránsito y heladas), cambios de temperatura y condiciones de estratificación”.¹⁵⁴ Las tuberías de PVC tienen las tasas de fallo más bajas de la industria en los EE. UU. y Canadá.¹⁵⁵

Las tuberías de hierro fallan principalmente debido a la corrosión. De acuerdo con un estudio de 2011 realizado por la Fundación de Investigaciones de la AWWA, las tuberías de hierro dúctil con las paredes más delgadas (que representan la mayoría de las tuberías metálicas vendidas) en suelos moderadamente corrosivos tienen una esperanza de vida de tan solo 11 a 14 años.¹⁵⁶ “Con suelos corrosivos que afectan un 75 % de todos los servicios de agua de los Estados Unidos, junto con las reducciones significativas en el espesor de la pared de las tuberías de hierro en el último siglo, la longevidad de las tuberías de hierro ha caído en picada”.¹⁵⁷ La Fundación de Investigación en Agua AWWA confirma la expectativa de vida de las tuberías de agua de PVC en más de 110 años y un estudio europeo

determinó que la longevidad de las tuberías de PVC es de 170 años.^{158 159} Además, un nuevo estudio realizado por el Laboratorio de Estructuras Enterradas de la Universidad Estatal de Utah respalda el PVC como material sustentable de tuberías con una vida útil de más de 100 años.¹⁶⁰

▶ Pérdida de agua en tuberías de presión

Durante mucho tiempo se ha reconocido y representado la pérdida de agua en tuberías de presión en los sistemas de agua. Las tuberías sujetas a corrosión han tenido fugas a partir de tuberías picadas y juntas que han generado pérdidas no medidas de agua y han creado líneas de zanjas saturadas. En el pasado, las reparaciones se realizaban solo cuando las fugas eran tan graves que creaban una corriente a presión por encima del suelo o causaban un fallo del pavimento. Por desgracia, hay poca documentación sobre las tasas históricas de fugas para los diferentes materiales de tuberías utilizados en los sistemas de distribución. Sin embargo, hay documentación sobre las tasas de fallos de los diferentes materiales de tuberías. El estudio *Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study* (Tasas de roturas de tuberías principales de agua en los EE. UU. y Canadá: un estudio integral) se utilizó para identificar el volumen de pérdidas en tuberías principales de agua por cada 100 pies.¹⁶¹ Sobre la base de las tasas de roturas de tuberías principales de agua por 100 millas por año identificadas en el estudio, la pérdida de agua por cada 100 pies de tubería por año se calculó suponiendo un tiempo de 240 minutos para reparar un fallo y una tasa de flujo más o menos equivalente al flujo producido a 2 pies por segundo (fps). La pérdida anual de volumen debido a roturas de tuberías principales de agua para cada material de tuberías se convirtió luego a la energía incorporada en 100 años para el agua perdida usando el valor de 1410 kWh/millón de galones determinado por el estudio, *Embodied Energy of Lost Water: Evaluating the Energy Efficiency of Infrastructure Investments* (Energía incorporada del agua perdida: evaluación de la eficiencia energética de inversiones en infraestructura).¹⁶²

En este estudio se consideró la pérdida de agua en relación con las roturas de tuberías principales para calcular la energía incorporada para tuberías de presión. Las roturas de tuberías principales pueden tener grandes variaciones en el volumen de pérdida de agua debido a la magnitud de la rotura y el tiempo antes de que se descubra y se repare. Aunque hay muchas variables a tener en cuenta para fugas y roturas, a los efectos de este estudio se asumió una tasa de flujo común a todas las alternativas de tuberías dentro de cada clase de presión con base en la tasa de flujo volumétrico para tuberías de PVC a 2 pies por segundo de velocidad. Como se ha indicado anteriormente, todos los datos de la tasa de rotura de tuberías para calcular la pérdida de agua se enumeran en la Figura A.1. Las tasas de rotura utilizadas para tuberías de hierro dúctil para este estudio son conservadoras según la Tabla A.1, que muestra que otros estudios asignan una tasa de rotura mucho mayor.^{163 164 165} La Tabla A.2 proporciona los datos, cálculos y resultados para la energía incorporada en pérdida de agua en 100 años para cada material de tuberías.

TABLA A.1 : INVESTIGACIONES/ESTUDIOS DE TASAS DE FALLOS Y ROTURAS DE TUBERÍAS PRINCIPALES

Estudio	Año	Metodología	Tasa de fallo			Limitaciones
			Tubería de hierro fundido	Tubería de hierro dúctil	Tubería de PVC	
Rajani y McDonald	1992	21 respuestas de la encuesta de Canadá	56,2	14,9	1,44	Diámetro, tamaño, edad de la tubería, tasa de fallo para cada servicio público, análisis de regresión de fallo no proporcionado
	1993		58,7	15,7	0,8	
Folkman	2012	188 respuestas de la encuesta de los EE. UU. y Canadá	24,4	4,9	2,6	Diámetro de menos de 24", tasa de fallo para cada servicio público no proporcionado
CUIRE	2012	21 respuestas de la encuesta de los EE. UU.	49,3	9.5	N/C*	Diámetro de más de 24", tasa de fallo para cada año no proporcionado

*No se incluyó PVC en este estudio.



TABLA A.2 : VOLUMEN DE PÉRDIDA DE AGUA POR AÑO Y ENERGÍA INCORPORADA EN PÉRDIDA DE AGUA EN 100 AÑOS

Material de la tubería	Tamaño/DR/PC de PVC	Tasa de flujo (gpm)	Tiempo de rotura (min)	Tasa de fallo (cantidad/100 pies/año)	Volumen anual de pérdida (galones/100 pies/año)	Energía incorporada del agua tratada (kWh/Mgal)	Energía incorporada de pérdida de agua en 100 años (kWh/100 pies)
PVC	8"/18/235	312	240	0,000492	36,9	1410	5.2
	24"/25/165	2730	240	0,000492	322,6	1410	45,5
DI	8"/-/350	312	240	0,000928	69,5	1410	9,8
	24"/-/200	2730	240	0,000928	608,0	1410	85,7
HDPE	8"/9,0/250	312	240	0,000492	36,9	1410	5.2
	24"/13,5/160	2730	240	0,000492	322,6	1410	45,5
PCCP	24"/-/200	2730	240	0,001023	670,0	1410	94,5

► **Tubería de presión: Cálculos de energía hidráulica**

Con el fin de hacer cálculos en un período de 100 años para la infraestructura de tuberías subterráneas, se requirieron varias suposiciones y metodologías. Las tablas y figuras siguientes aplican los siguientes supuestos en los cálculos para la comparación de tuberías de presión:

- Usa el diámetro interno promedio calculado para cada tubería a comparar y calcula el área de transporte de la tubería.
- Calcula el flujo para la tubería de PVC a comparar con base en una velocidad de 2 pies por segundo en la tubería de PVC.
- Utilizando la tasa de flujo de la tubería calculada, calcula la pérdida de fricción de la tubería en pies por 100 pies usando la ecuación de Hazen-Williams con el factor C basado en la tasa de deterioro anual para la tubería que está siendo comparada y los sustitutos que restablecen el factor C.
- Calcula la potencia hidráulica con base en la tasa de flujo y la pérdida de carga.
- Determina la potencia necesaria de la bomba sobre la base de una supuesta eficiencia de la bomba del 75 %.

- Calcula la potencia del motor necesaria sobre la base de una supuesta eficiencia del motor del 90 %.
- Calcula la energía eléctrica requerida por el motor en kilovatios.
- Calcula la energía eléctrica anual requerida con base en el total de horas por año y kWh por cada 100 pies requeridos.
- Calcula el costo anual de energía por cada 100 pies usando un costo asumido de energía a partir de USD 0,07/kWh y un aumento de USD 0,01/kWh por década.
- Determina la energía total en 100 años requerida por requisitos totales anuales de energía.
- Determina el costo total de energía en 100 años al totalizar los costos anuales de energía.

Tenga en cuenta que no se pueden realizar comparaciones a través de las clases de presión de tuberías de PVC, ya que los flujos se basan en el diámetro interno de cada clase específica de presión de tubería. En la Tabla A.3 se muestra la energía total de bombeo en 100 años y el costo por cada 100 pies para cada tubería. En la Figura A.3 se muestran los resultados para la energía total de bombeo en 100 años por 100 pies. En la Figura A.4 se muestran los resultados para los costos totales de bombeo por 100 pies.

TABLA A.3 : 100 AÑOS DE ENERGÍA DE BOMBEO POR 100 PIES Y COSTO DE BOMBEO EN 100 AÑOS POR 100 PIES DE TUBERÍA

Material de la tubería	Clase de presión y tamaño comparables de tuberías de PVC					
	8" 235 psi		8" 165 psi		24" 165 psi	
	kWh/100 pies/100 años	USD/100 pies/100 años	kWh/100 pies/100 años	USD/100 pies/100 años	kWh/100 pies/100 años	USD/100 pies/100 años
PVC	12.700	\$ 1.500	13.100	\$ 1.500	31.500	\$ 3.600
HDPE	25.400	\$ 2.900	19.400	\$ 2.200	46.800	\$ 5.400
DI	16.400	\$ 1.900	20.200	\$ 2.300	40.000	\$ 4.600
PCCP	N/C	N/C	N/C	N/C	50.100	\$ 5.800

Nota: La tabla supone la sustitución de tuberías de polietileno de alta densidad a los 50 años, tuberías de hierro dúctil a los 50 años y de concreto pretensado a los 75 años.

FIGURA A.3: USO TOTAL EN 100 AÑOS DE ENERGÍA DE BOMBEO POR 100 PIES DE TUBERÍA

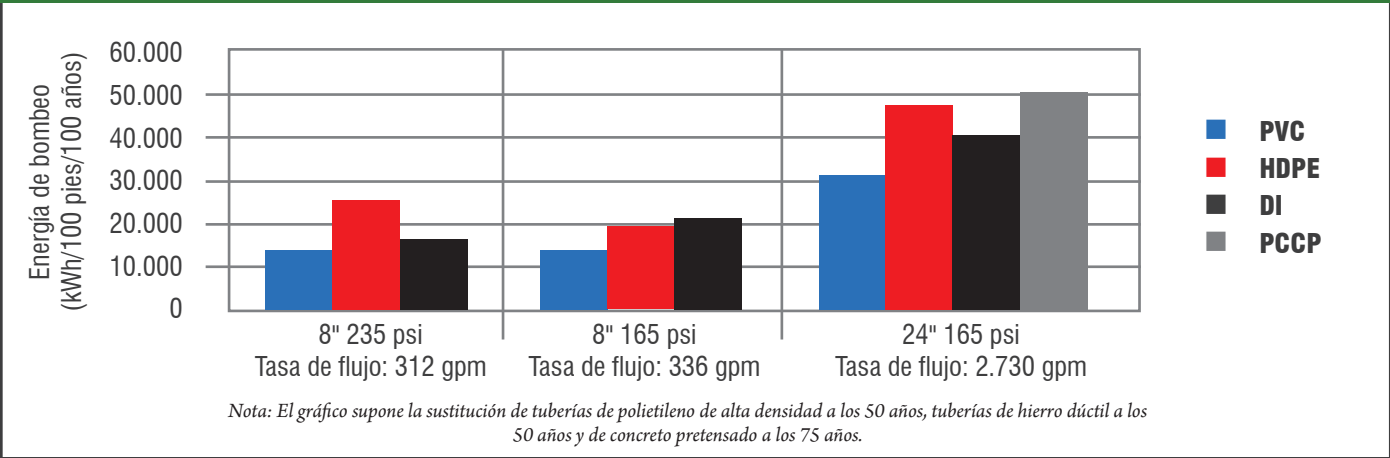
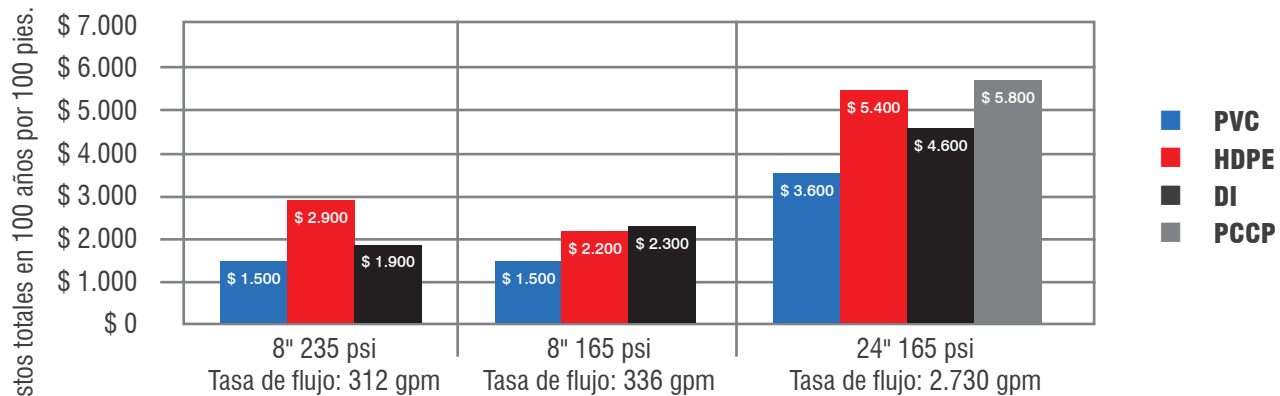


FIGURA A.4: COSTOS TOTALES EN 100 AÑOS DE ENERGÍA DE BOMBEO POR 100 PIES DE TUBERÍA

Nota: El gráfico supone la sustitución de tuberías de polietileno de alta densidad a los 50 años, tuberías de hierro dúctil a los 50 años y de concreto pretensado a los 75 años.

► Tubería de presión: Cálculos de energía incorporada total

La energía de bombeo durante la duración estimada de 100 años es un componente importante de la energía incorporada total de una tubería de presión. Esto incluye la energía de la cuna a la puerta para la energía en la fabricación de tuberías, el transporte y la instalación, la energía asociada con la protección contra la corrosión, el bombeo de energía durante el período del ciclo de vida, la energía requerida para sustituciones necesarias durante el período del ciclo de vida y la energía relacionada con pérdidas de agua debido a fugas y reparaciones.

No toda la energía del ciclo de vida es fácil de cuantificar (como la energía para el mantenimiento y la reparación). Las comparaciones de energía incorporada para las tuberías de presión de PVC se basan en el tamaño y la clase de presión. La energía incorporada total en 100 años asociada con las comparaciones de tuberías de presión de PVC en este estudio se resume en las Tablas A.4, A.5 y A.6. Las Figuras A.5, A.6 y A.7 ilustran la ventaja de la energía incorporada total del ciclo de vida en 100 años de las tuberías de PVC.

TABLA A.4 : COMPARACIÓN DE ENERGÍA INCORPORADA TOTAL EN 100 AÑOS (MJ/100 PIES) PARA TUBERÍAS DE PVC DR18 PC235 C900 DE 8"

Actividad del ciclo de vida de 100 años	Comparación para tuberías de PVC DR18 de 8"		
	PVC DR18 PC235	HDPE 4710 DR9 PC250	DI CL51 PC350
Cuna a la puerta	23.300	42.600	50.900
Transporte final e instalación	4.100	4.700	5.300
Protección contra la corrosión	N/C	N/C	3.300
Total de cuna a instalación	27.400	47.300	59.500
Sustitución	N/C	47.300	59.500
Energía hidráulica en 100 años	45.700	91.400	59.000
Pérdida de agua/100 años	19	19	35
Energía incorporada total en 100 años	73.100	186.000	178.000

FIGURA A.5 : TUBERÍAS EQUIVALENTES DE PVC DR18 DE 8": ENERGÍA INCORPORADA TOTAL EN 100 AÑOS

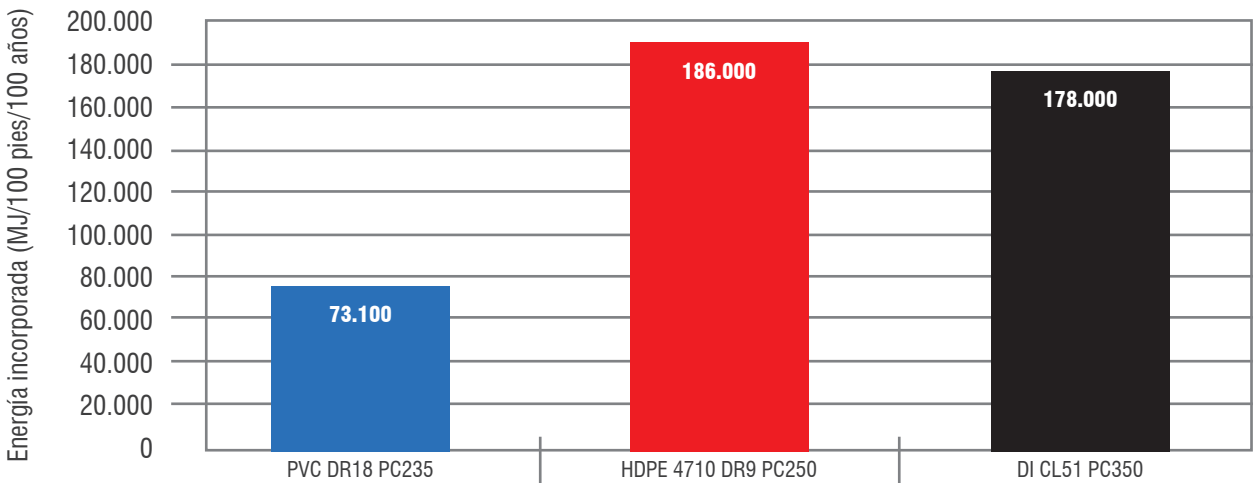


TABLA A.5 : COMPARACIÓN DE ENERGÍA INCORPORADA TOTAL EN 100 AÑOS (MJ/100 PIES) PARA TUBERÍAS DE PVC DR25 PC165 C900 DE 8"

Actividad del ciclo de vida de 100 años	Comparación de tuberías de PVC DR25 de 8"		
	PVC DR25 PC165	HDPE 4710 DR13.5 PC160	DI CL51 PC350
Cuna a la puerta	15.900	29.600	50.900
Transporte final e instalación	4.000	4.400	5.300
Protección contra la corrosión	N/C	N/C	3.300
Total de cuna a instalación	19.900	34.000	59.500
Sustitución	N/C	34.000	59.500
Energía hidráulica en 100 años	47.000	70.000	72.700
Pérdida de agua/100 años	19	19	35
Energía incorporada total en 100 años	66.900	138.000	191.700

FIGURA A.6 : TUBERÍAS EQUIVALENTES DE PVC DR25 DE 8": ENERGÍA INCORPORADA TOTAL EN 100 AÑOS

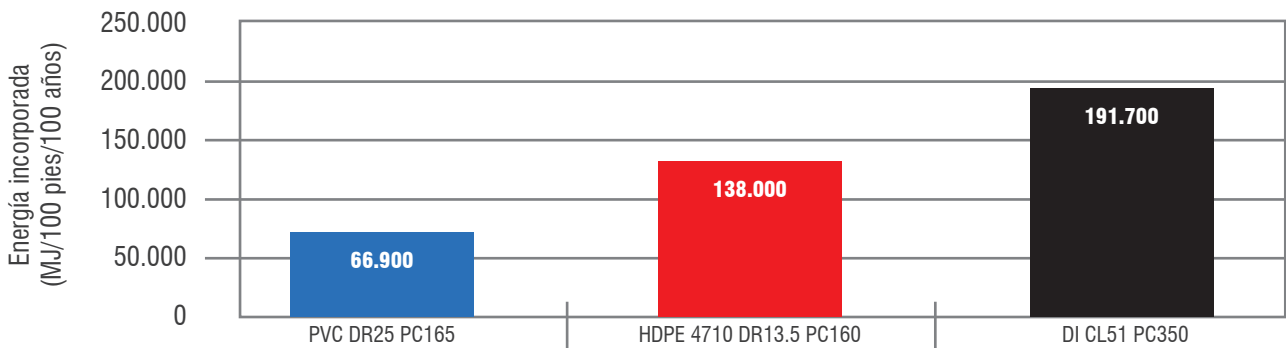
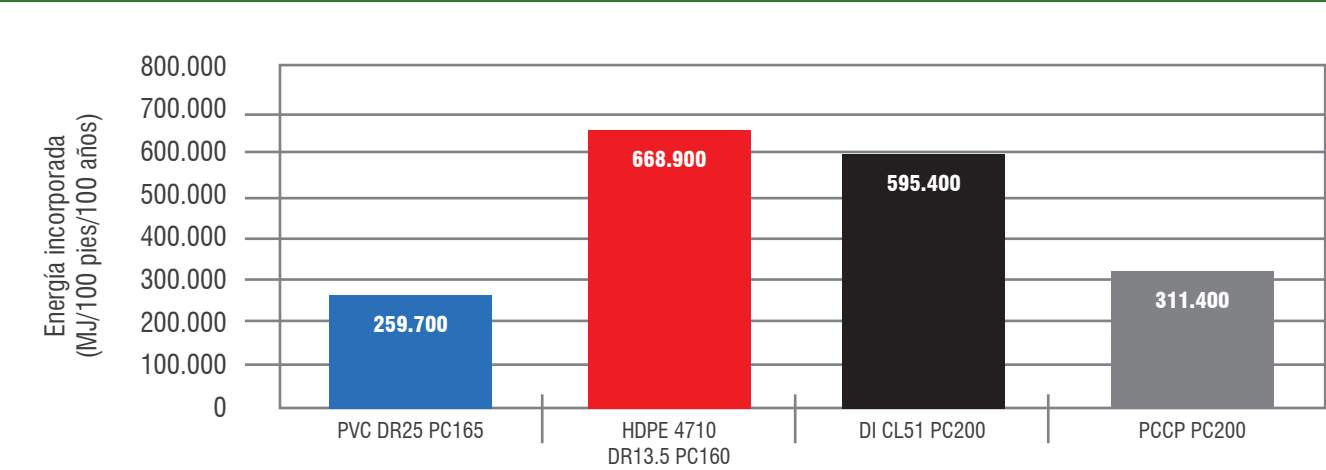


TABLA A.6 : COMPARACIÓN DE ENERGÍA INCORPORADA TOTAL EN 100 AÑOS (MJ/100 PIES) DE TUBERÍAS DE PVC DR25 PC165 C905 DE 24"

Actividad del ciclo de vida de 100 años	Comparación de tuberías de PVC DR25 de 24"			
	PVC DR25 PC165	HDPE 4710 DR13.5 PC160	DI CL51 PC200	PCCP PC200
Cuna a la puerta	137.900	240.800	206.600	53.500
Transporte final e instalación	8.300	9.300	10.000	11.900
Protección contra la corrosión	N/C	N/C	8.900	N/C
Total de cuna a instalación	146.200	250.100	225.500	65.400
Sustitución	N/C	250.100	225.500	65.400
Energía hidráulica en 100 años	113.300	168.500	144.100	180.300
Pérdida de agua/100 años	160	160	310	340
Energía incorporada total en 100 años	259.700	668.900	595.400	311.400



FIGURA A.7 : TUBERÍAS EQUIVALENTES DE PVC DR25 DE 24": ENERGÍA INCORPORADA TOTAL EN 100 AÑOS



TUBERÍA POR GRAVEDAD

La capacidad de una tubería de gravedad está determinada por su tasa de flujo para un diámetro dado en una pendiente dada. Las comparaciones de capacidad para tuberías por gravedad se basaron en la pendiente requerida para conseguir una velocidad de flujo de 2 pies por segundo (fps). Para cada tipo de tubería por gravedad, la pendiente utilizada para la comparación se fijó para lograr el flujo mínimo de 2 pies por segundo. Como base para comparar todas las demás tuberías por gravedad para cada tipo de tubería se utilizó la tubería con peores características de flujo, es decir, la tubería que requería la pendiente más pronunciada para lograr una velocidad mínima de flujo de 2 pies por segundo. Con sus paredes interiores lisas, las tuberías de PVC tuvieron consistentemente la mayor capacidad de flujo para cada tipo de tubería en la pendiente determinada. En algunos casos, una tubería de alcantarillado de PVC de menor diámetro logró flujos similares o mayores que los productos competitivos más grandes, generando ahorros en costos y energía incorporada.

Las especificaciones para el diseño de sistemas de tuberías por gravedad suelen utilizar las tuberías menos eficientes para establecer los valores de base de coeficientes de flujo y pendientes mínimas. Esto tiene el efecto de reducir las ventajas de los materiales más eficientes, como las tuberías de PVC. Estas normas de diseño menos eficientes, que incluyen un mayor coeficiente de rugosidad (n) de Manning y requisitos de pendiente mínima más pronunciada, dan como resultado un aumento de tamaño de la tubería y añaden costos innecesarios a los proyectos de infraestructuras subterráneas.

► Cálculos de energía incorporada total de tuberías por gravedad

Los cálculos de energía incorporada total de tuberías por gravedad en 100 años incluyen:

- La energía de la cuna a puerta para la fabricación de tuberías
- La energía para el transporte y la instalación
- La energía asociada con la protección de tuberías corroídas
- La energía si se requiere una sustitución durante el período del ciclo de vida

En la Tabla A.7 y en las Figuras A.8 y A.9 se enumeran los valores de energía incorporada total en 100 años para tuberías por gravedad utilizados en este estudio.

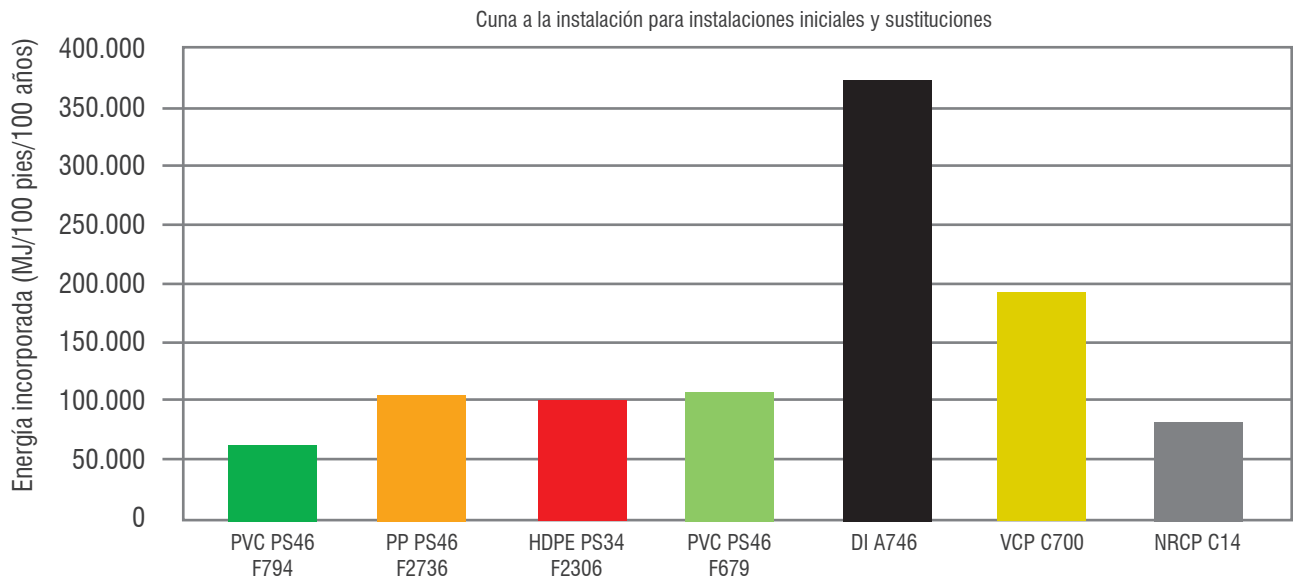
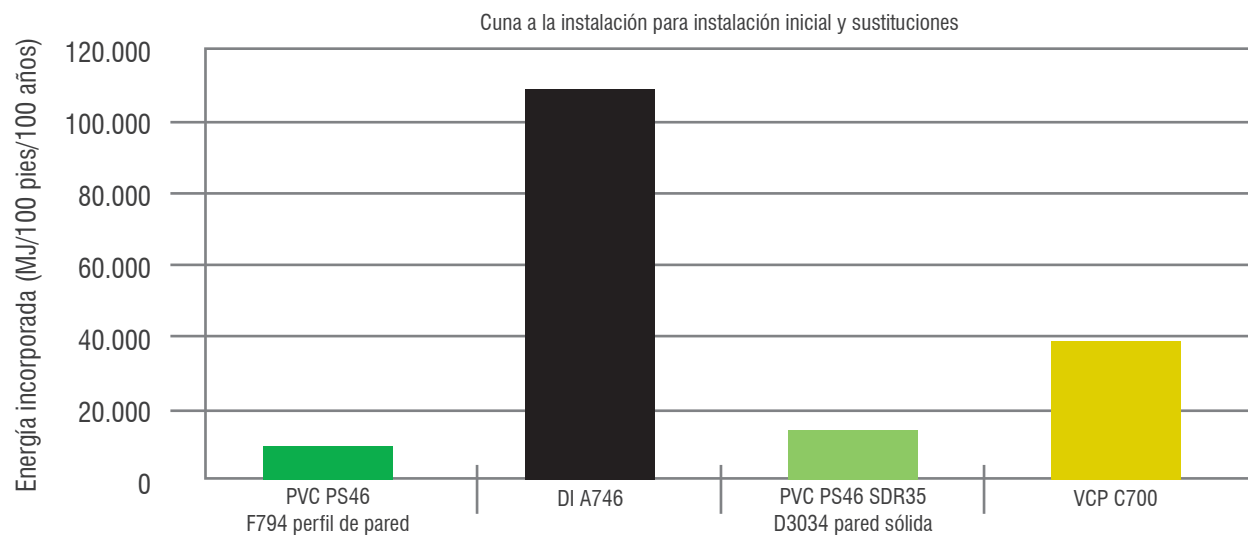
Los flujos volumétricos para las otras tuberías de comparación se calcularon y compararon usando la misma pendiente que la tubería con la pendiente más pronunciada requerida para conseguir una velocidad de flujo de 2 pies por segundo. Además, para las opciones de tamaño de tuberías de 24 pulgadas, se evaluó la tubería de PVC con el siguiente tamaño más pequeño.



TABLA A.7 : COMPARACIONES DE ENERGÍA INCORPORADA TOTAL EN 100 AÑOS DE TUBERÍAS POR GRAVEDAD INCLUYENDO SUSTITUCIONES

Medida del PVC y producto	Productos comparables	Estándar	Energía incorporada (MJ/100 pies) en 100 años
PVC DE 8" PS46 F794 perfil de pared	PVC DE 8" PS46	ASTM F794	9.800
	DI de 8"	ASTM A746	108.500
PVC de 24" PS46 F794 perfil de pared	PVC de 24" PS46	ASTM F794	57.400
	PP de 24" PS46	ASTM 2736	102.900
	24" HDPE PS34	ASTM 2306	101.200
	PVC de 21" PS46	ASTM F794	43.300
PVC de 8" PS46 SDR35 D3034 pared sólida	PVC DE 8" PS46	ASTM D3034	13.900
	DI de 8"	ASTM A746	108.500
	8" VCP	ASTM C700	38.400
PVC de 24" PS46 F679 pared sólida	PVC de 24" PS46	ASTM F679	107.700
	DI de 24"	ASTM A746	376.000
	24" VCP	ASTM C700	193.800
	NRCP de 24"	ASTM C14	77.100
	PVC de 21" PS46	ASTM F679	83.100

Nota: Todas las tuberías de alcantarillado de hierro dúctil en este estudio están doblemente revestidas con cemento según la norma AWWA C104.

FIGURA A.8 : ENERGÍA INCORPORADA TOTAL EN 100 AÑOS PARA TUBERÍAS POR GRAVEDAD DE 24"**FIGURA A.9 : ENERGÍA INCORPORADA TOTAL EN 100 AÑOS PARA TUBERÍAS POR GRAVEDAD DE 8"**

Se examinaron las capacidades de transporte de flujo de los materiales de tuberías comparados usando el procedimiento descrito en el presente documento. En la Tabla A.8 se muestran las capacidades basadas en el procedimiento.

La Figura A.10 demuestra que tubería de perfil de pared de PVC PS46 ASTM F794 de 8 pulgadas tiene una mayor capacidad en comparación con la tubería de hierro dúctil ASTM A746 de 8 pulgadas. La tubería de hierro dúctil de 8 pulgadas tiene casi un 20 % menos capacidad que la tubería de PVC de perfil de pared de 8 pulgadas en la misma pendiente.

La Figura A.11 muestra que la tubería de perfil de pared de PVC ASTM F794 de 24 pulgadas tiene una mayor capacidad de flujo que las tuberías de perfil de pared competitivos de polipropileno ASTM F2736 de 24 pulgadas y de polietileno de alta densidad ASTM F2306 de 24 pulgadas. Las tuberías de perfil de pared de polipropileno y polietileno de alta densidad tienen un 23 % y un 21 % menos de capacidad que la tubería de perfil de pared de PVC de 24 pulgadas en la misma pendiente, respectivamente. Como parte del estudio, se compararon tuberías de PVC más pequeñas con tuberías competitivas más grandes. La tubería de perfil de pared de PVC de 21 pulgadas tiene solo un poco menos de capacidad que las tuberías de polipropileno y polietileno de alta densidad en la misma

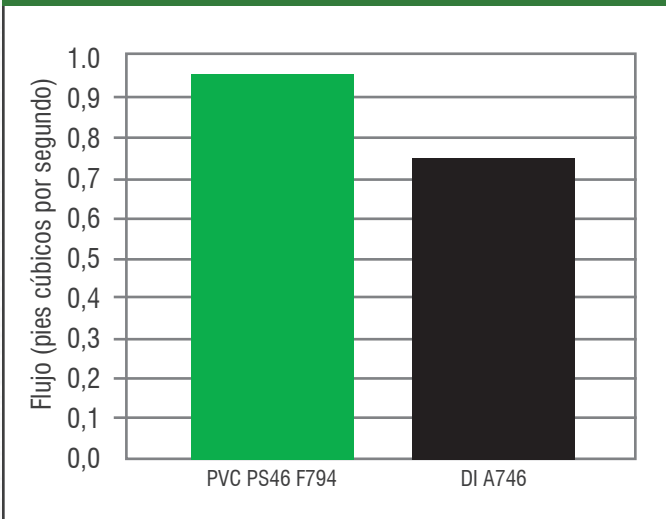
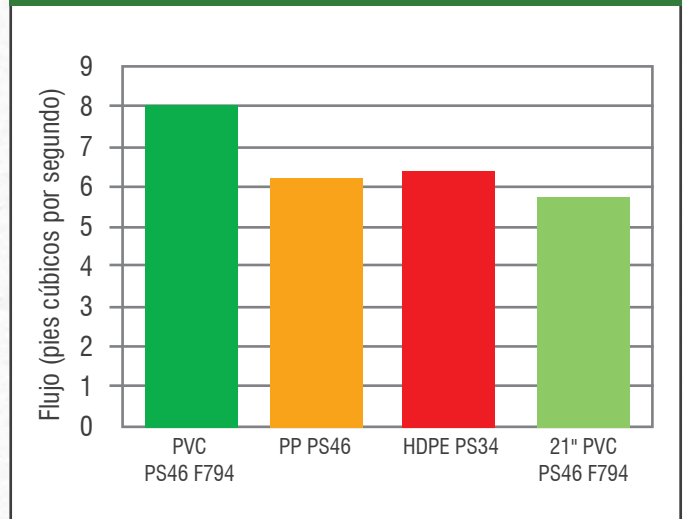
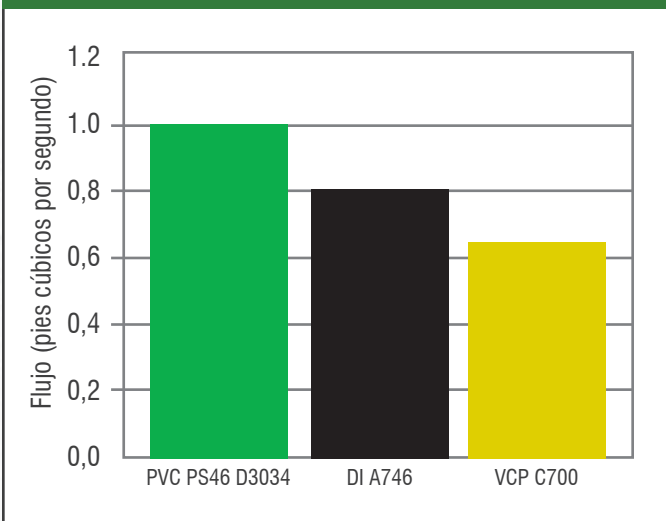
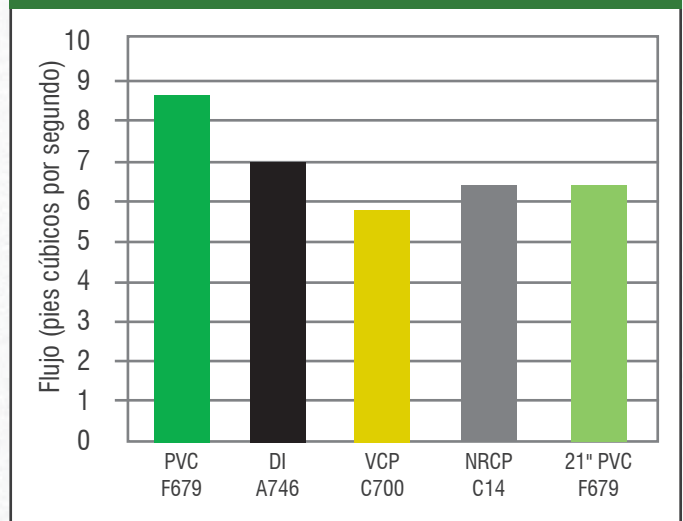
pendiente. En situaciones en las que el flujo de diseño está muy cerca de la capacidad de los productos de polipropileno y polietileno de alta densidad, un tamaño más pequeño de tuberías de PVC podría cumplir con los requisitos de flujo con un mayor ahorro en costos y energía incorporada.

La Figura A.12 muestra la comparación de tuberías por gravedad de pared sólida de 8 pulgadas. Como se puede ver en la Figura A.12, y como se puede calcular de la Tabla A.8, la comúnmente utilizada tubería de pared sólida de PVC ASTM D3034 de 8 pulgadas tiene un 25 % más capacidad que la tubería de hierro dúctil de 8 pulgadas en la misma pendiente. La tubería de PVC de 8 pulgadas también tiene un 56 % más capacidad que la tubería de arcilla vitrificada de 8 pulgadas en la misma pendiente. El tamaño de la tubería de 8 pulgadas es el tamaño de tubería mínimo estándar en muchos sistemas de alcantarillado sanitario en todo el país, ya que brinda espacio para actividades de limpieza y mantenimiento mientras dispone de una capacidad adecuada para la mayoría de los bloques de desarrollo residencial y comercial. En escenarios donde el flujo aumenta debido al tamaño de la zona de recolección, la capacidad de flujo superior de la tubería de PVC de 8 pulgadas puede ser capaz de servir a un área más grande antes de que surja la necesidad de aumentar el tamaño de la tubería por la capacidad adicional de flujo.

TABLA A.8 : COMPARACIÓN DEL FLUJO DE TUBERÍAS POR GRAVEDAD USANDO UNA PENDIENTE COMÚN

Tamaño y tipo de pared	Descripción de la tubería	Estándar	n	Pendiente (pies/pies)	Velocidad calculada (pies/segundos)	Flujo calculado (pies cúbicos por segundo)	Diferencia en cantidad (%)
Alcantarillado de perfil de pared de 24"	PVC de 24" PS46	ASTM F794	0,009	0,00067	2,6	7,98	0,0
	PP de 24" PS46	ASTM F2736	0,012	0,00067	2,0	6,17	-22,7
	HDPE de 24" PS34	ASTM F2306	0,012	0,00067	2,0	6,32	-20,8
	PVC de 21" PS46	ASTM F794	0,009	0,00067	2,4	5,72	-28,3
Alcantarillado de perfil de pared de 8"	PVC DE 8" PS46	ASTM F794	0,009	0,0032	2,8	0,94	0,0
	8" DI PC350	ASTM A746	0,013	0,0032	2,0	0,76	-19,5
Alcantarillado de pared sólida de 8"	8" PVC PS46 SDR35	ASTM D3034	0,009	0,0035	2,9	1,00	0,0
	8" DI PC350	ASTM A746	0,013	0,0035	2,1	0,80	-19,5
	VCP de 8"	ASTM C700	0,013	0,0035	2,0	0,64	-35,4
Alcantarillado de pared sólida de 24"	PVC de 24" PS46	ASTM F679	0,009	0,00081	2,9	8,71	0,0
	24" DI PC250	ASTM A746	0,013	0,00081	2,1	7,01	-19,6
	VCP de 24"	ASTM C700	0,013	0,00081	2,0	5,80	-33,4
	NRCP de 24"	ASTM C14	0,013	0,00081	2,1	6,45	-25,9
	PVC de 21" PS46	ASTM F679	0,009	0,00081	2,7	6,36	-27,0

Nota: Todas las tuberías de alcantarillado de hierro dúctil en este estudio están doblemente revestidas con cemento según la norma AWWA C104.

FIGURA A.10 : COMPARACIONES DE FLUJO DE TUBERÍAS POR GRAVEDAD DE PVC DE PERFIL DE PARED DE 8" CON PENDIENTE EQUIVALENTE**FIGURA A.11 : COMPARACIONES DE FLUJO DE TUBERÍAS POR GRAVEDAD DE PVC DE PERFIL DE PARED DE 24" CON PENDIENTE EQUIVALENTE****FIGURA A.12 : COMPARACIONES DE FLUJO DE TUBERÍAS POR GRAVEDAD DE PVC DE PARED SÓLIDA DE 8" CON PENDIENTE EQUIVALENTE****FIGURA A.13 : COMPARACIONES DE FLUJO DE TUBERÍAS POR GRAVEDAD DE PVC DE PARED SÓLIDA DE 24" CON PENDIENTE EQUIVALENTE**

La Figura A.13 compara las tuberías de PVC ASTM F679 con otras tuberías de pared sólida de 24 pulgadas. Las tuberías de PVC tienen un 24 % más de capacidad que las tuberías de hierro dúctil, un 50 % más que las tuberías de arcilla y un 35 % más que las tuberías de concreto no reforzado (NRCP, por sus siglas en inglés) en la misma pendiente.

En la misma pendiente, una tubería de pared sólida de PVC de 21 pulgadas tiene las siguientes capacidades en relación con productos alternativos de 24 pulgadas:

- Solo un 9 % menos de capacidad que las tuberías de hierro dúctil de 24 pulgadas
- Aproximadamente un 10 % más de capacidad que las tuberías de arcilla vitrificada de 24 pulgadas
- Solo un 1 % menos de capacidad que las tuberías de concreto no reforzado de 24 pulgadas

Una tubería por gravedad de PVC más pequeña puede tener la misma capacidad que una tubería competitiva más grande debido a sus características de flujo superior. Al dimensionar la tubería, los ingenieros de diseño deben mirar de cerca las capacidades de las tuberías de PVC con base en sus atributos de diseño.

Dado que las tuberías de gravedad no usan energía, el uso de energía proviene principalmente de la energía incorporada en la tubería de la cuna a la instalación. Esta energía, así como la energía para las nuevas tuberías de sustitución durante el período estimado de 100 años, puede cuantificarse; sin embargo, hay muchos otros casos en los que las tuberías por gravedad requieren o crean uso de energía. Algunos de estos incluyen (pero no se cuantificaron) actividades de mantenimiento y la energía para tratar flujos de infiltración.

► Flujos de infiltración

Ciertos materiales de tuberías pueden crear la necesidad de uso de energía para tratar el agua superficial y subterránea que entra en las tuberías a través de juntas con fugas y grietas y corrosión en las tuberías. El agua de infiltración puede ser de un flujo de más de cuatro veces el normal durante eventos de lluvia. La infiltración crea la necesidad de una gran cantidad de energía incorporada en tuberías sobredimensionadas para dar cabida a la capacidad de flujo adicional, en la construcción de capacidad de almacenamiento para almacenar el flujo adicional, en la adición de capacidad de bombeo y en el tratamiento de las aguas residuales. Puede haber también costos adicionales en multas, órdenes administrativas y mejoras de capital para evitar desbordamientos de aguas residuales sin tratar. Hasta la fecha, no se dispuso de investigaciones que vinculen las tasas de infiltración de materiales específicos de tuberías para cuantificar la enorme cantidad de energía adicional requerida debido a infiltraciones. Los atributos de las tuberías de PVC, como las juntas sin fugas y la resistencia a la corrosión, las convierten en la opción más lógica para usar como tuberías de alcantarillado que no crea demanda de infiltración.

RESUMEN DE ENERGÍA INCORPORADA EN EL MATERIAL DE LA TUBERÍA

La Tabla A.9 enumera la energía incorporada de la cuna a la puerta (es decir, a partir de las materias primas a través de la fabricación, sin incluir el transporte del producto final y la instalación) por 100 pies de tubería de PVC y para cada material que es similar en especificación a los productos de PVC analizados en el estudio. Al comprender que el resultado de cada material deriva de una fuente diferente con un grado variable de calidad de los datos, los valores de la cuna a la puerta de energía incorporada para las diferentes tuberías todavía puede ilustrarse.

TABLA A.9 : RESUMEN DE LA ENERGÍA INCORPORADA DE LA CUNA A LA PUERTA PARA PVC Y MATERIALES ALTERNATIVOS DE TUBERÍAS

Medida del PVC y producto	Productos comparables	Estándar	Energía incorporada (MJ/100 pies)
PVC de 8" DR18 PC235 C900	PVC de 8" DR18	AWWA C900	23.300
	HDPE de 8" 4710 DR9	AWWA C906	42.600
	DI de 8" CL51	AWWA C151	50.900
PVC de 8" DR25 PC165 C900	PVC de 8" DR25	AWWA C900	15.900
	HDPE de 8" 4710 DR13.5	AWWA C906	29.600
	DI de 8" CL51	AWWA C151	50.900
PVC de 24" DR25 PC165 C905	PVC de 24" DR25	AWWA C905	137.900
	HDPE de 24" 4710 DR13.5	AWWA C906	240.800
	DI de 24" CL51	AWWA C151 AWWA C104	206.600
	PCCP de 24" PC200	AWWA C301	53.500
PVC de 24" PS46 F794 perfil de pared	PVC de 24" PS46	ASTM F794 AASHTO M304	49.700
	PP de 24" PS46	ASTM F2736	43.700
	HDPE de 24" PS34	ASTM F2306	42.900
PVC DE 8" PS46 F794 perfil de pared	PVC DE 8" PS46	ASTM F794 AASHTO M304	5.900
	DI de 8"	ASTM A746	46.500
PVC de 8" PS46 SDR35 D3034 pared sólida	PVC DE 8" PS46	ASTM D3034	10.000
	DI de 8"	ASTM A746	46.500
	8" VCP	ASTM C700	10.800
PVC de 24" PS46 F679 pared sólida	PVC de 24" PS46	ASTM F679	98.600
	DI de 24"	ASTM A746	176.600
	VCP de 24"	ASTM C700	82.400
	NRCP de 24"	ASTM C14	21.300

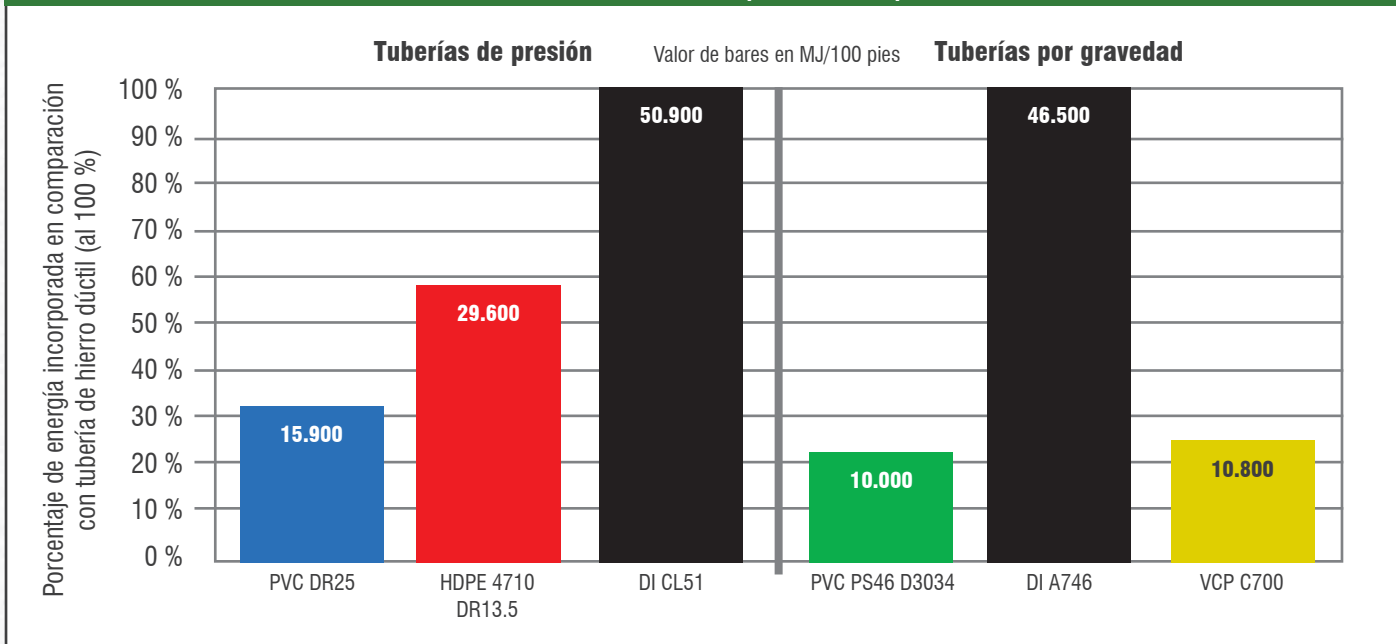
Nota: Todas las tuberías de presión de hierro dúctil en este estudio están revestidas con cemento según la norma AWWA C104.

Todas las tuberías de alcantarillado de hierro dúctil en este estudio están doblemente revestidas con cemento según la norma AWWA C104.

La Figura A.14 compara otros materiales de tubería con la energía incorporada de tuberías de hierro dúctil fijada al 100 % dado que tiene los valores de energía incorporada más altos. La energía incorporada de tuberías de PVC es competitiva en comparación con tuberías de hierro dúctil y otros materiales alternativos. Las tuberías de presión de PVC DR25 de 8 pulgadas tienen un 69 % menos de energía incorporada que las tuberías de hierro dúctil revestidas con cemento y un 46 % menos que las tuberías de polietileno de alta

densidad. Si se requiere sustituir el material de una tubería durante el ciclo de vida de 100 años, la energía incorporada de ese material se incrementa en consecuencia. La energía incorporada total de la cuna a la puerta para tuberías por gravedad de PVC PS46 D3034 de 8 pulgadas es 83 % menor que para tuberías de hierro dúctil revestidas con cemento cuando se consideran sustituciones durante la duración estimada de 100 años.

FIGURA A.14 : COMPARACIONES DE ENERGÍA INCORPORADA DE LA CUNA A LA PUERTA PARA TUBERÍAS EQUIVALENTES DE 8" (MJ/100 PIES)



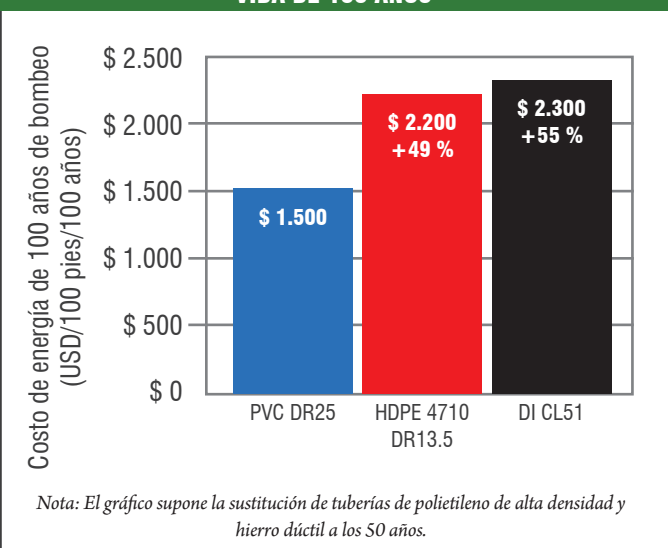
Nota: La energía total incorporada en 100 años incluye el análisis de la cuna a la instalación, sustituciones necesarias y protección contra la corrosión.

COMPARACIONES DE ENERGÍA DE BOMBEO DURANTE UN CICLO DE VIDA DE 100 AÑOS

Los sistemas de distribución de agua requieren cantidades significativas de energía de bombeo para superar las fuerzas de fricción entre las paredes de la tubería y el agua que fluye. La energía necesaria para bombear el agua a través de tuberías de PVC se mantiene constante durante la vida útil de la tubería, a diferencia de las tuberías metálicas y de concreto. Esto genera ahorros generales en el costo del ciclo de vida y un impacto ecológico menor en comparación con los materiales que requieren más energía de bombeo con el tiempo debido a la rugosidad de sus superficies interiores causada por la corrosión y la degradación interna.

En la Figura A.15, las tuberías de agua de PVC DR25 de 8 pulgadas tienen un costo menor de bombeo en el ciclo de vida de 100 años por 100 pies debido a que tienen una menor demanda de energía de bombeo que las tuberías de polietileno de alta densidad y de hierro dúctil. La energía necesaria para bombear el agua a través de un sistema de tuberías a presión durante la vida útil de las tuberías es una fuente significativa de impactos ambientales potenciales.

FIGURA A.15 : COSTO DE ENERGÍA DE BOMBEO DE TUBERÍAS EQUIVALENTES DE PVC DR25 DE 8" DURANTE UN CICLO DE VIDA DE 100 AÑOS



Nota: El gráfico supone la sustitución de tuberías de polietileno de alta densidad y hierro dúctil a los 50 años.

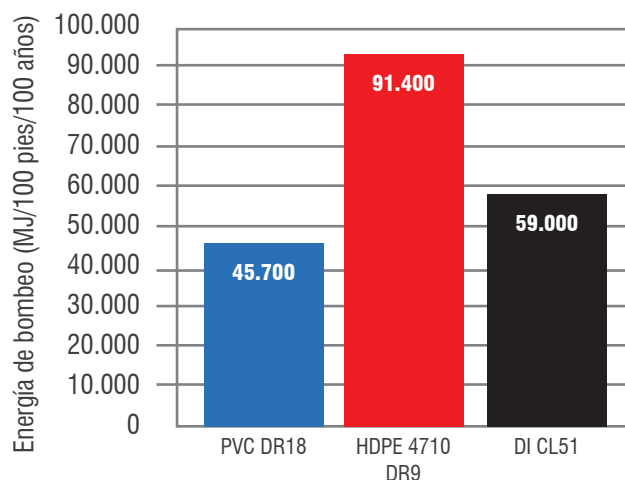
Las tuberías de PVC no están sujetas a la corrosión, a diferencia de las tuberías de hierro y concreto, ni a la oxidación química que afecta al polietileno de alta densidad. La corrosión y la oxidación química aumentan el riesgo de fallo y pérdida de agua de las tuberías y reducen los beneficios de sustentabilidad para los servicios de agua.

La corrosión afecta al 75 % de los servicios de agua.¹⁶⁶ La durabilidad y la resistencia a la corrosión de una tubería afectan en gran medida los efectos ambientales del ciclo de vida. Las tuberías de hierro dúctil pueden durar tan poco como 11 a 14 años en suelos moderadamente corrosivos, lo cual requiere que se sustituyan muchas veces durante un período de 100 años.¹⁶⁷ Esto aumenta los efectos ambientales inherentes a las tuberías de hierro unas nueve veces en comparación con las tuberías de PVC.

La energía de bombeo representa entre el 24 % y el 75 % de la energía incorporada total en 100 años, en función del tamaño y el material de las tuberías. La pared interior lisa de la tubería de PVC ayuda a minimizar este impacto. El hecho de que el PVC no se corroe significa que la tubería de PVC tiene, sobre la duración estimada del sistema de tuberías, menor energía de bombeo y costos de operación en comparación con los materiales de tuberías propensos a la corrosión. Además, las tuberías de PVC no experimentan un aumento de la fricción de la tubería y la energía de bombeo a través del tiempo, característico de las tuberías revestidas con cemento.

Más empresas de servicios públicos y los gobiernos locales están implementando estrategias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero como parte de sus objetivos a largo plazo. Los sistemas de tratamiento y de entrega de aguas municipales requieren una cantidad significativa de energía para mover el agua. Las empresas de agua y aguas residuales a menudo representan tanto como el 40 % del consumo total de energía de un municipio.¹⁶⁸ Escoger tuberías de PVC proporciona bajos efectos inherentes y paredes consistentemente lisas que no se corroen, que ayudan a los servicios públicos y los gobiernos locales a minimizar la energía (y los gases de efecto invernadero) requerida en sus sistemas de agua.

FIGURA A.16 : TUBERÍAS EQUIVALENTES DE PVC DR18 DE 8" ENERGÍA DE 100 AÑOS DE BOMBEO

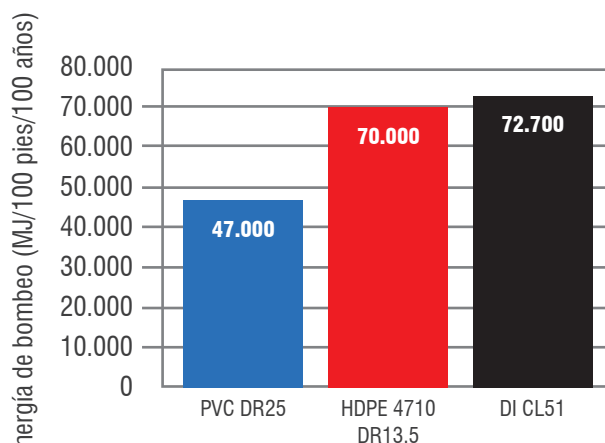


Nota: El gráfico supone la sustitución de tuberías de polietileno de alta densidad y hierro dúctil a los 50 años.

La pérdida de la capacidad de carga y los mayores costos de bombeo se deben mucho más a los efectos de la corrosión, fugas y tuberculación de las tuberías de hierro que a las diferencias menores de diámetro interno entre las tuberías de hierro y las de PVC. Por otra parte, las tuberías de polietileno de alta densidad tienen un diámetro interno mucho más pequeño que las de hierro dúctil o las de PVC, lo cual impacta significativamente en los requisitos de energía de bombeo con el tiempo.

La Figura A.16 compara tuberías de PVC DR18 de 8 pulgadas con tuberías de presión similares. El deterioro del revestimiento de cemento y la corrosión de las tuberías de hierro dúctil generan mayor uso de energía de bombeo durante el ciclo de vida que las tuberías de PVC. Debido a la menor resistencia a la tracción, las tuberías de polietileno de alta densidad tienen paredes gruesas y un diámetro interno más pequeño, lo cual resulta en una zona de transporte reducida y una mayor energía de bombeo durante el ciclo de vida.

FIGURA A.17 : TUBERÍAS EQUIVALENTES DE PVC DR25 DE 8" ENERGÍA DE 100 AÑOS DE BOMBEO



Nota: El gráfico supone la sustitución de tuberías de polietileno de alta densidad y hierro dúctil a los 50 años.

La Figura A.17 ilustra la diferencia en la energía de bombeo requerida en el ciclo de vida para tuberías de PVC DR25 de 8 pulgadas en comparación con las tuberías de hierro dúctil y polietileno de alta densidad. Una vez más, el deterioro del revestimiento de mortero y la corrosión de la tubería de hierro dúctil y la zona de transporte disminuida de las tuberías de polietileno de alta densidad resultan en mayores requisitos de energía de bombeo del ciclo de vida y costos para esos materiales.

La Figura A.18 compara tuberías de PVC DR25 de 24 pulgadas con tuberías de hierro dúctil, polietileno de alta densidad y concreto pretensado de clases de presión similares. Cuando se consideran el diámetro y el deterioro del factor de fricción de todos los materiales de tuberías, las tuberías de PVC de 24 pulgadas son la opción más clara y sustentable para la eficiencia en la energía de bombeo.

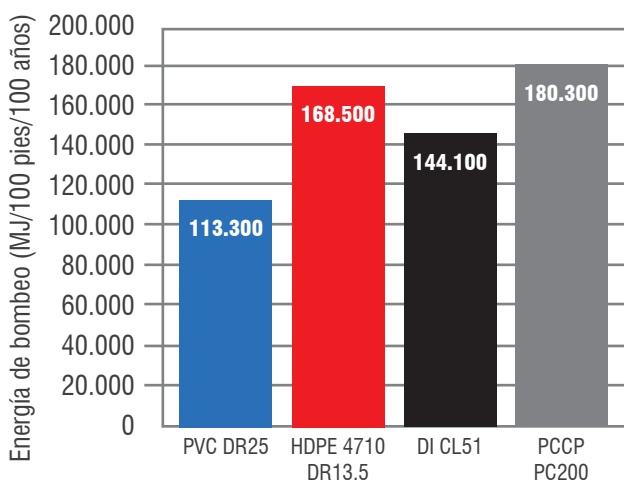
Las paredes lisas, los diámetros grandes y la falta de deterioro del factor de fricción para las tuberías de PVC resultan en procesos

más sustentables que solo la energía de bombeo del ciclo de vida. Las instalaciones de bombeo están diseñadas para la capacidad del sistema de tuberías a largo plazo que recibirá el suministro por su descarga. Los materiales tales como el hierro dúctil y el concreto pretensado pueden tener un diámetro interno más grande y un factor de fricción respetable cuando son nuevos, pero las instalaciones de bombeo no están diseñadas teniendo en cuenta la capacidad de las tuberías nuevas. El hierro dúctil y el concreto pretensado pueden experimentar al menos una disminución del 30 % en el factor de fricción durante la vida útil de las tuberías. Esto puede resultar en un aumento del 100 % en la potencia de bombeo requerida para el mismo flujo en tuberías nuevas que en tuberías de mayor edad.

Mediciones aplicadas para el análisis de la etapa de uso de las tuberías de presión

- ▷ La velocidad de flujo de las tuberías de PVC fue de 2 pies por segundo
- ▷ Las tuberías competitivas se evaluaron usando la misma tasa de flujo volumétrico
- ▷ Se utilizaron diámetros reales basados en normas
- ▷ Se determinaron las pérdidas por fricción utilizando factores C de Hazen-Williams realistas
- ▷ Se incluyó el deterioro del factor C para cada material de tuberías
- ▷ Se determinó la energía de la etapa de uso utilizando la energía de bombeo para comparar la tasa de flujo a lo largo de 100 años
- ▷ Los cálculos de energía incorporada incluyeron la energía del proceso de la cuna a la instalación, de las sustituciones necesarias, de 100 años de bombeo y de pérdida de agua en 100 años

FIGURA A.18 : TUBERÍAS EQUIVALENTES DE PVC DR25 DE 24" ENERGÍA DE 100 AÑOS DE BOMBEO



Nota: El gráfico supone la sustitución de tuberías de polietileno de alta densidad a los 50 años, tuberías de hierro dúctil a los 50 años y de concreto pretensado a los 75 años.

El hecho de que el PVC no se corroe significa que la tubería de PVC tiene, sobre la duración estimada del sistema de tuberías, menor energía de bombeo y costos de operación en comparación con los materiales de tuberías propensos a la corrosión.

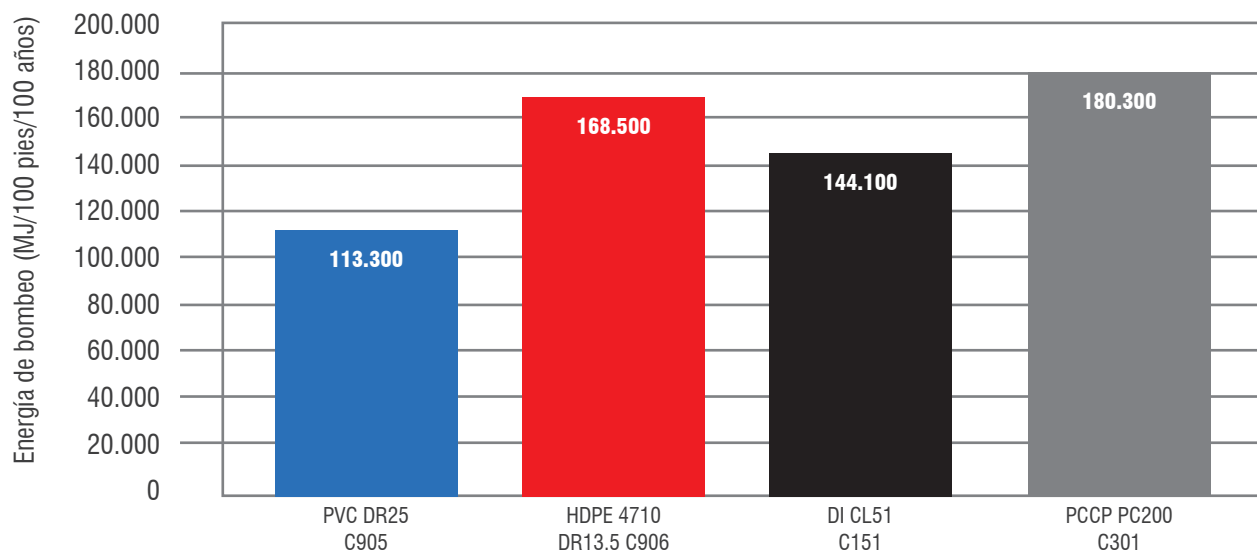
► Energía total de 100 años de bombeo: Costos en el tiempo utilizando tuberías con distinta vida útil

Una revisión de la bibliografía existente sobre el análisis del ciclo de vida a disposición del público muestra que las tuberías de PVC tienen menos impactos incorporados y efectos en la etapa de uso en comparación con otras tuberías. Sin embargo, la energía de bombeo es el componente más grande de toda la energía incorporada del ciclo de vida de 100 años del material de una tubería. Por lo tanto, la eficiencia de bombeo en el tiempo es crítica. Las Figuras A.19 y A.20 ilustran las diferencias en la energía de bombeo de varios materiales de tuberías. La Figura A.19 muestra la energía de bombeo de tuberías de 24 pulgadas basada en la vida útil conforme a lo que se determinó

en este estudio. La Figura A.20 demuestra el aumento de la energía de bombeo más allá de la vida útil de los materiales de tuberías propensos a la corrosión como el hierro dúctil y el concreto pretensado. Las figuras A.21 y A.22 muestran que el uso de un material de tuberías más allá de su vida útil resulta en mayores costos de bombeo. Este estudio evaluó la longevidad de tuberías de polietileno de alta densidad y de hierro dúctil a 50 años y de concreto pretensado a 75 años.

En las figuras A.20, A.21 y A.22, los bares a 50 y 75 años tienen en cuenta que la nueva tubería se instala a los 50 y 75 años, respectivamente, dentro de la duración estimada del sistema de 100 años. Esto restablece el factor de fricción al de la nueva tubería en ese momento. Para los bares a 100 años, la nueva tubería no se instaló, por lo que el factor de fricción no se restablece durante el período de 100 años.

FIGURA A.19 : ENERGÍA DE 100 AÑOS DE BOMBEO DE TUBERÍAS EQUIVALENTES DE PVC DR25 DE 24"



Nota: El gráfico supone la sustitución de tuberías de polietileno de alta densidad a los 50 años, tuberías de hierro dúctil a los 50 años y de concreto pretensado a los 75 años.

FIGURA A.20 : ENERGÍA TOTAL DE 100 AÑOS DE BOMBEO DE TUBERÍAS EQUIVALENTES DE PVC DR25 DE 24" USANDO TUBERÍAS CON DISTINTA VIDA ÚTIL

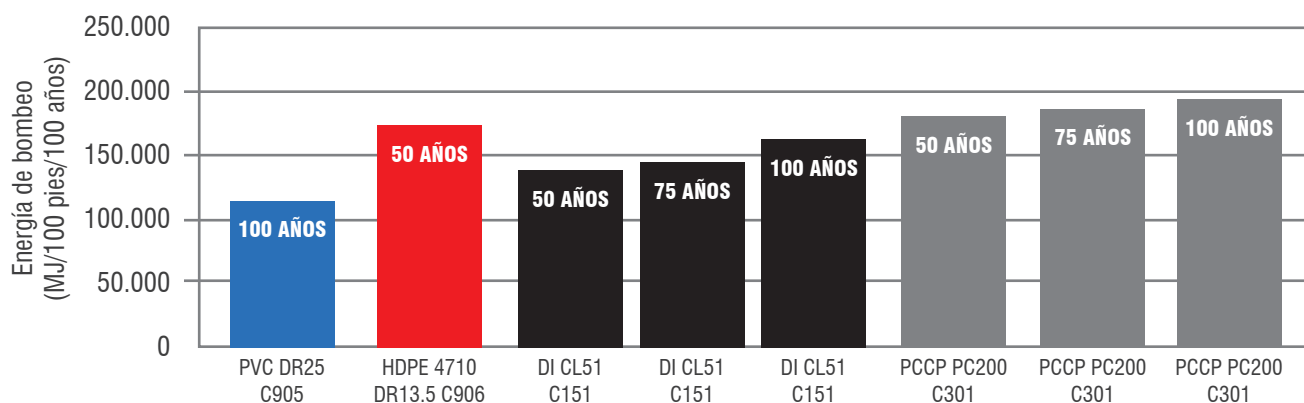
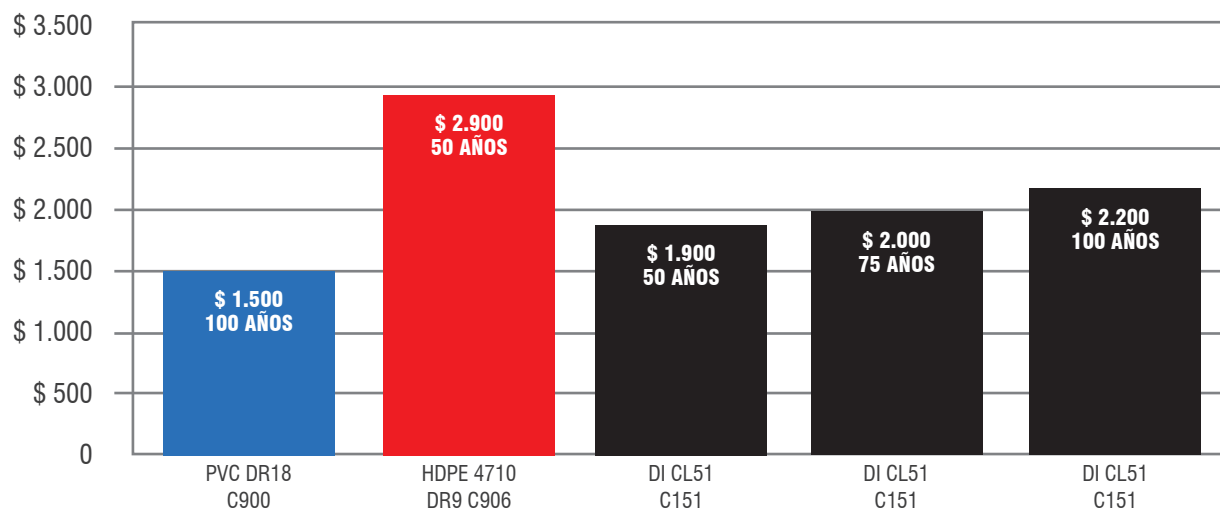
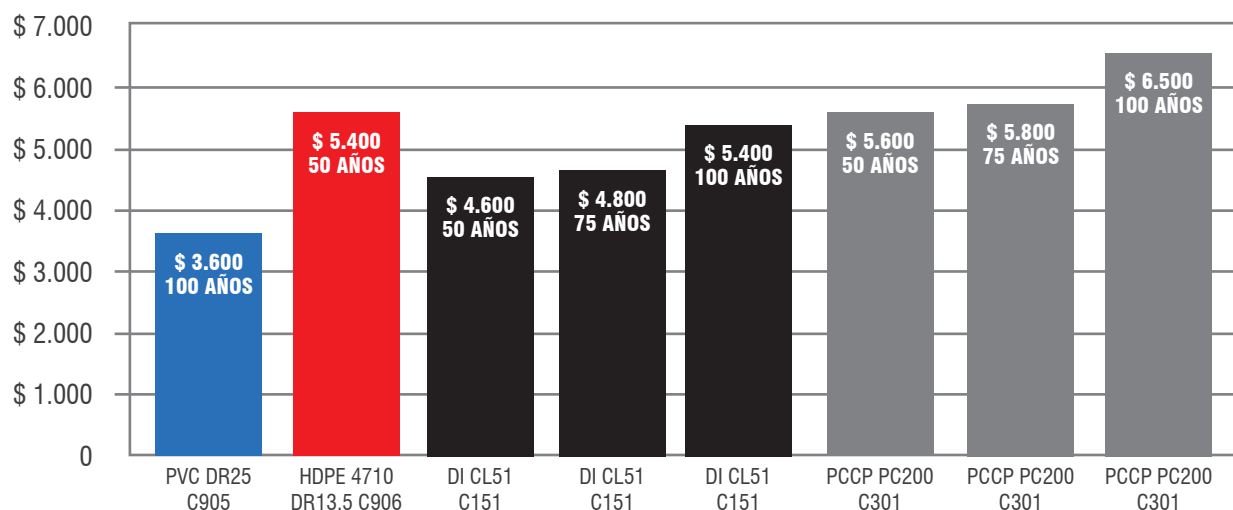


FIGURA A.21 : COSTO TOTAL DE 100 AÑOS DE BOMBEO PARA LAS TUBERÍAS EQUIVALENTES DE PVC DR18 DE 8" USANDO TUBERÍAS CON DISTINTA VIDA ÚTIL (USD/100 PIES/100 AÑOS)**FIGURA A.22 : COSTO TOTAL DE 100 AÑOS DE BOMBEO EN TUBERÍAS EQUIVALENTES DE PVC DR25 DE 24" USANDO TUBERÍAS CON DISTINTA VIDA ÚTIL (USD/100 PIES/100 AÑOS)**

Las figuras A.20, A.21 y A.22 usan diferentes vidas útiles para las tuberías de hierro y concreto para proporcionar a los profesionales de servicios públicos estimaciones comparativas precisas de costos y energía de bombeo para un período de 100 años. Esto requiere una redefinición de los conceptos tradicionales de la vida útil de las tuberías. Durante gran parte del tiempo que las tuberías de hierro y concreto han sido consideradas “en servicio” en realidad no lo estuvieron, ya que no estaban funcionando como fueron diseñadas. Durante una buena parte del tiempo que están en uso, son propensas a roturas en cañerías principales de agua, pérdida de agua, problemas con la calidad del agua y mayores costos de mantenimiento y funcionamiento debido a la corrosión. Esto afecta de manera significativa la eficiencia de bombeo. A medida que estas

tuberías envejecen, sus paredes internas se vuelven más rugosas, lo que eleva los costos de bombeo. La degradación de la pared interna de la tubería puede comenzar casi inmediatamente después de la instalación de las tuberías de hierro dúctil y de concreto, lo que resulta en la disminución de la eficiencia de bombeo, mayor consumo de energía y mayores costos de bombeo con el paso del tiempo. Este no es el caso de las tuberías de PVC, que mantienen su factor C durante el período de 100 años. Al igual que las tuberías de hierro y concreto, que pueden degradarse y no funcionar adecuadamente después de 50 años, las tuberías de polietileno de alta densidad, con su factor más bajo de problemas de seguridad, deformación por fluencia y oxidación, pueden no funcionar de forma adecuada durante los 50 años de servicio, a pesar de mantener su eficiencia de bombeo.^{169 170}

► Comparaciones del costo del ciclo de vida durante un ciclo de vida de 100 años

En cuanto a los costos totales del ciclo de vida para que un servicio público compre y mantenga tuberías, se analizaron las siguientes tendencias para diferentes clases de tuberías en cien pies de tubería durante un periodo de 100 años. Al comprender que los servicios públicos mantienen millas de tuberías, estos costos se agravan y aumentan rápidamente. En comparación con otros materiales, el PVC tiene costos generales mínimos para toda la vida útil de 100 años de un sistema de agua. Debido a que las tuberías de polietileno de alta densidad y hierro dúctil pueden no durar 100 años, es posible que sea necesario sustituirlas, lo cual incrementa el costo. Si no se reemplaza la tubería de hierro dúctil después de que su funcionamiento se ha deteriorado significativamente, el incremento en los costos de bombeo y de mantenimiento debido a la corrosión aumentarán los costos del ciclo de vida para ese sistema. Esta estimación no tiene en cuenta los costos para mantener el material de una tubería, tales como la adición de revestimientos interiores y exteriores, la mitigación catódica y otros esfuerzos que pueden tener que llevarse a cabo para permitir que la tubería dure los 100 años de duración estimada.

ESTUDIO DE FALLOS EN TUBERÍAS DE HIERRO FUNDIDO (CI) Y HIERRO DÚCTIL (DI) DE TUBERÍAS PRINCIPALES DE AGUA

Una empresa grande de servicios públicos puede experimentar más de 300 roturas de tuberías principales de agua por año. Un estudio de la Universidad de Texas en Arlington analizó 31.560 fallos en la sección de las tuberías principales de agua hechas con tuberías de hierro fundido y de hierro dúctil durante un período de 110 años.¹⁷¹

► Hierro fundido bruto

Muchas de las tuberías originales de hierro, llamadas tuberías de hierro fundido bruto, están experimentando fallos por corrosión ya que fueron instaladas a comienzos del siglo XX y llegaron al final de su vida útil hace ya mucho tiempo. El hierro fundido fue fabricado inicialmente a partir del siglo XIX, pero su producción cobró importancia en 1914.¹⁷² Originalmente, las tuberías de hierro fundido utilizaban un método que “unía estas tuberías [utilizando] plomo fundido junto con una cuerda (estopa)” con juntas de campana y espiga.¹⁷³ Las juntas de plomo se utilizaban mucho en las tuberías de hierro fundido y todavía existen hoy en día en los sistemas de tuberías de más de 60 años.¹⁷⁴ Un estudio con una empresa de agua muestra que se instalaron tuberías de hierro fundido gris bruto desde 1872 hasta 1945, con un número significativo de instalaciones entre 1925 y 1931. Los análisis de fallos revelaron que 3611 fallos en secciones de tuberías tenían una vida útil de más de 75 años, seguidos por 1818 con una vida útil de 50 a 75 años; 1676 tenían entre 25 y 50 años de vida útil y solo 20 fallos tenían menos de 25 años de vida útil.¹⁷⁵

► Hierro fundido gris

“Las instalaciones de tuberías de hierro fundido gris centrífugo siguieron a las tuberías de hierro fundido gris bruto en la década de 1920 y su producción en masa comenzó en la década de 1930”.¹⁷⁶ “El hierro fundido centrífugo era más delgado y más fuerte en comparación con las tuberías de hierro fundido bruto. El revestimiento de cemento

y el nuevo compuesto para juntas Leadite a base de azufre, es decir cemento plastificado de azufre, se introdujeron en el mismo período de tiempo que los materiales para juntas. Finalmente se descubrió que las juntas con Leadite tenían más fisuras y corrosión que las de plomo. Las juntas de goma flexible se introdujeron en la década de 1950 como juntas mejoradas”.¹⁷⁷

“Las empresas de agua instalaron tuberías de hierro fundido gris centrífugo desde 1946 hasta 1964, con un total de 17.364 instalaciones, que superaron las tuberías de hierro fundido gris bruto en un período relativamente corto de tiempo. Se disponía de información completa sobre 9683 fallos. Teniendo en cuenta estos fallos, ninguna sección de tubería tenía una vida útil de más de 75 años. 2641 tenían una vida útil de entre 50 y 75 años. Una cantidad significativa de 6812 tuberías de hierro gris centrífugo tenían entre 25 y 50 años de vida útil y solo había 7 fallos que tenían menos de 25 años de vida útil”.¹⁷⁸

► La vida útil del hierro dúctil es de menos de 50 años

“Las tuberías de hierro dúctil se introdujeron en la industria de las tuberías en 1948, se produjeron hacia 1955 y se usaban ampliamente hacia 1979. Las instalaciones de tuberías de hierro dúctil observadas [de empresas de agua son] de entre 1953 y 1982. Teniendo en cuenta estos fallos, ninguna sección de tubería tenía una vida útil de más de 75 años. El 3 % de los fallos observados tenía una vida útil de 50 a 75 años, mientras que el 79 % de los fallos tenía una vida útil de 25 a 50 años. Por último, el 18 % de los fallos tenía menos de 25 años de vida útil”.¹⁷⁹

“Las tuberías de hierro fundido gris bruto funcionaban mejor que las tuberías de hierro fundido gris centrífugo y las tuberías de hierro dúctil en lo que se refiere a la vida útil. La principal causa de fallo del hierro fundido gris bruto es la corrosión, seguida de roturas transversales, fallos en el plomo de las juntas de campana y espiga, fisuras y, por último, fallos en las juntas de campana y espiga con Leadite. Para las tuberías de hierro fundido gris centrífugo, las roturas transversales son la principal causa de fallos, seguida por la corrosión, los fallos en el plomo de las juntas de campana y espiga y las fisuras. También se observaron fallos en las juntas mecánicas de bloqueo y en las de presión. La corrosión es la causa principal de fallo en las tuberías de hierro dúctil, seguida por roturas transversales y luego, fallos en las juntas mecánicas de bloqueo”.¹⁸⁰

Basándose en los resultados del estudio de caso, “las tuberías de hierro fundido de 6 pulgadas, 8 pulgadas, 12 pulgadas y 16 pulgadas tuvieron la mayor cantidad de fallos durante una vida útil de 25 a 50 años”.¹⁸¹

“Los datos disponibles de diferentes tipos de juntas utilizadas para 31.258 tuberías de hierro fundido y de hierro dúctil combinadas muestran que [fueron] utilizadas en las empresas de [agua] una increíble cantidad de 25.977 juntas de plomo de campana y espiga que representan alrededor del 83 % de todas las juntas”.¹⁸²

Estos resultados son confirmados por otras encuestas y estudios donde la edad promedio de los fallos en tuberías (roturas en tuberías principales para agua) es de 47 años,¹⁸³ y el hecho de que muchas empresas de servicios públicos informan que sus nuevas tuberías de hierro [dúctil] están fallando al mismo tiempo que las tuberías de hierro de más edad.

Países como Japón tienen una vida útil legalmente designada para las tuberías de agua de hierro que se ha fijado en 40 años con el fin de evitar las consecuencias de la corrosión, la pérdida de agua, problemas con la calidad del agua y cuestiones de salud pública.¹⁸⁴

► Las tuberías de hierro dúctil tienen paredes más delgadas

La vida útil de las tuberías de hierro no es lo mismo que el tiempo que una tubería puede estar enterrada, es decir, por ejemplo “el final de la vida física”. Antes de que las tuberías de hierro lleguen al final de su vida física, pueden poner la calidad del agua en riesgo drásticamente y aumentar de forma significativa los costos operativos y de mantenimiento. El rendimiento y el análisis económico de una tubería también incluyen las fugas que elevan los costos de bombeo de energía y pueden degradar la calidad del agua. Ejemplos recientes siguen demostrando que las tuberías de hierro de 100 años presentan una carga significativa sobre la comunidad, como en el caso donde hay una pérdida de agua del 80 %.¹⁸⁵

CORROSIÓN, LIXIVIACIÓN Y RIESGOS EN LA CALIDAD DEL AGUA DE LAS TUBERÍAS DE HIERRO

La investigación relacionada con otros materiales de tuberías y la corrosión es compatible con las conclusiones de este informe. Los posibles efectos ambientales del proceso de la cuna a la puerta de los materiales de tubería pueden variar mucho. Del mismo modo, las características de rendimiento de las tuberías también pueden diferir en gran medida en el transcurso de la vida útil de un sistema de tuberías. Ciertos tipos de materiales de tuberías son susceptibles a la corrosión interna a medida que pasan los años. Una reacción electroquímica que involucra componentes metálicos de una tubería es la principal causa de corrosión interna. Esta corrosión aumenta la rugosidad de la superficie interior de la tubería, lo cual crea más fricción (consulte la Figura A.23) y requiere más energía de bombeo durante la vida útil del sistema.¹⁸⁶

► Al utilizar tuberías de hierro, se usan más productos químicos (inhibidores de corrosión) para el agua potable

Los aditivos químicos utilizados para el control de la corrosión incluyen fosfatos, silicatos y aquellos que afectan el equilibrio del sistema de carbonato (cantidad de carbonato en el sistema) tal como el hidróxido de calcio, el hidróxido de sodio, el bicarbonato de sodio y el carbonato de sodio. Los inhibidores de corrosión se usan comúnmente para tratar la influencia de la corrosión de los aditivos para el tratamiento de aguas ácidas.¹⁸⁷

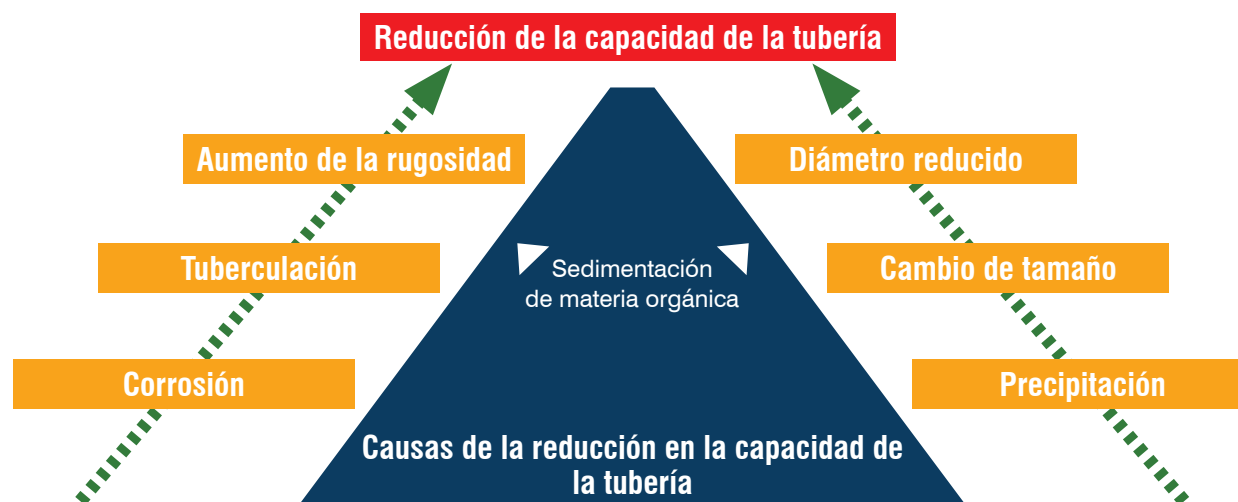
► El revestimiento de cemento es una posible fuente de lixiviación de metales pesados

La infraestructura del sistema de distribución y los accesorios pueden reaccionar con el agua que suministran, así como el ambiente externo. Los materiales a base de cemento incluyen tuberías de concreto reforzado o pretensado, revestimientos de mortero de cemento y tuberías de fibrocemento. Dos componentes generales de los materiales a base de cemento incluyen los conglomerados y el aglutinante. Pueden presentarse varios tipos de degradación de los materiales de cemento en presencia de aguas ácidas o aguas agresivas para el carbonato de calcio.^{188 189 190 191 192 193}

La lixiviación es un mecanismo que puede resultar en la degradación del agua distribuida. La lixiviación de revestimientos de cemento puede ocurrir en aguas blandas, agresivas y mal amortiguadas. En condiciones estáticas, los metales como el aluminio, el arsénico, el bario, el cromo y el cadmio pueden lixiviar a partir de revestimientos de cemento, incluso cuando se usan materiales certificados según NSF/ANSI 61 y se aplican revestimientos.¹⁹⁴

Un estudio realizado en 1991 investigó el deterioro de los nuevos revestimientos de cemento en diversas condiciones de calidad del agua.¹⁹⁵ Las pruebas de campo demostraron que el agua agresiva es capaz de lixiviar compuestos de cemento a partir de estos revestimientos,

FIGURA A.23 : CORROSIÓN INTERNA Y TUBERCULACIÓN DE LAS TUBERÍAS PRINCIPALES DE AGUA: CAUSAS Y EFECTOS EN EL RENDIMIENTO



provocando incrementos significativos en el pH, la alcalinidad y el calcio de la solución. Todos los estudios de tuberías revestidas con cemento en uso durante 10 a 20 años mostraron degradación del revestimiento de mortero en forma de elementos lixiviados.¹⁹⁶ El agua que tiene un bajo contenido de iones es agresiva para el hidróxido de calcio en los cementos.¹⁹⁷ Esto significa que el agua suministrada a los consumidores puede no tener la calidad deseada, debido a un alto pH causado por la lixiviación de hidróxido de calcio. Esto también causa una pérdida gradual de la capacidad para proteger el hierro contra la corrosión. La pérdida de calcio hace que el revestimiento proteja menos contra la corrosión, ya que reduce el valor de pH en la capa delgada de agua entre el cemento y la pared interna de la tubería.

Los materiales de cemento contienen una variedad de sustancias químicas inorgánicas reguladas, muchas de las cuales son propensas a la lixiviación. Un estudio de 1998 realizó pruebas de laboratorio

Un estudio de 1999 incluyó la revisión de la instalación de 7200 pies de tuberías de hierro dúctil con revestimiento de cemento que hizo que los niveles de aluminio en un suministro de agua aumentaran de 5 µg/l a 690 µg/l en el transcurso de dos meses.²⁰² Más de dos años más tarde, el aluminio continuó lixiviando desde el revestimiento y produciendo agua con más de 100 µg/l de aluminio. Esto contribuyó a varias enfermedades y una tasa de mortalidad del 32 % en un centro de recepción de diálisis. El agua en contacto con la tubería era agua de mar que había sido desalinizada y posteriormente tratada con filtrado de carbón, fluoración y desinfección UV. El agua era agresiva (máximo índice de Langelier entre -0,5 y -1,5), blanda (dureza de 15-20 mg/l como CaCO₃) y de baja alcalinidad (no hay datos) con pH alto (8,5 a 9,5). La tubería había sido revestida con cemento en la fábrica por un proceso centrífugo rotativo. El grado de lixiviación también está fuertemente relacionado con el tiempo de contacto entre el agua y el revestimiento de cemento.

para determinar el grado de lixiviación de tuberías de hierro dúctil revestidas in situ con mortero de cemento Portland. Las tuberías fueron revestidas y se curaron de acuerdo con la norma ANSI/AWWA C602-89 y, posteriormente, desinfectadas de acuerdo con la norma ANSI/AWWA C651-92. El agua de la prueba era agua del grifo estándar proveniente de una empresa de agua de Nueva Jersey. En condiciones estáticas, bario, cadmio y cromo lixiviaron desde el revestimiento a una concentración mayor que los estándares de calidad del agua potable.¹⁹⁸

El alto contenido de aluminio en el cemento es positivo para las propiedades de protección del revestimiento, pero a la vez puede dar lugar a concentraciones más elevadas de aluminio en el agua que fluye a través de tuberías recién renovadas de hierro fundido o a través de nuevas tuberías principales para agua de hierro dúctil. La aplicación de revestimiento de cemento también puede conducir a la lixiviación de aluminio.¹⁹⁹

El aluminio plantea serios riesgos para la salud a los pacientes de hemodiálisis. La Unión Europea define una concentración de aluminio máximo de 30 mg/l en el agua utilizada para hemodiálisis. La EPA de los Estados Unidos ha establecido una gama de nivel máximo de contaminante (MCL, por sus siglas en inglés) secundario para el aluminio de 50-200 mg/l.²⁰⁰

Las aguas blandas, agresivas y mal tamponadas (es decir, baja alcalinidad) promueven la lixiviación de aluminio a partir de materiales de cemento. Estas son las mismas condiciones de calidad del agua que son conducentes a la lixiviación de plomo y cobre. El impacto de la lixiviación de calcio sobre el pH y la lixiviación del aluminio del cemento al agua es mayor en tuberías de diámetros pequeños. El agua desmineralizada, que es agresiva contra el concreto, puede causar altas concentraciones de calcio, aluminio y cromo en el agua.²⁰¹

Las empresas de servicios públicos deben mantener parámetros óptimos de calidad del agua en el punto de entrada al sistema de distribución y en varios lugares dentro del sistema de distribución para minimizar la lixiviación de plomo y cobre en el grifo. Sin embargo, en los últimos hallazgos relacionados con Flint, Michigan, y la lixiviación de plomo, la EPA ha encontrado muchos casos en todo el país donde los servicios públicos no estaban probando adecuadamente la calidad del agua. El Dr. M. Edwards, el primer científico en poner al descubierto la crisis de la lixiviación de plomo en Flint, junto con el Instituto Politécnico y la Universidad Estatal de Virginia, describió las pruebas de agua en algunas de las ciudades más grandes de EE. UU. como un "ultraje".²⁰³

Los inhibidores de la corrosión de polifosfato también atacan y suavizan los revestimientos de cemento, lo que acelera la lixiviación de cemento. "Estos inhibidores de la corrosión también pueden quelar y unirse al calcio y al aluminio solubles".²⁰⁴

► Hierro y manganeso provenientes de las tuberías de hierro

Existe una creciente preocupación por los altos niveles de hierro y manganeso en el agua transportada por los sistemas de tubería de hierro y es evidente que los niveles de hierro y manganeso aumentan a medida que el agua potable pasa a través de tuberías de hierro corroídas.²⁰⁵ "El exceso de manganeso interfiere con la absorción de hierro en la dieta. La exposición a largo plazo a niveles excesivos puede provocar anemia por deficiencia de hierro... Puede aumentar el crecimiento de bacterias en el agua. Los síntomas de toxicidad son similares a los de la enfermedad de Parkinson (temblores, rigidez muscular) y la ingesta excesiva de manganeso puede causar hipertensión en pacientes mayores de 40 años. Se han encontrado

aumentos significativos en las concentraciones de manganeso en pacientes con hepatitis severa y cirrosis post hepática, en pacientes que reciben diálisis y en pacientes que sufren ataques al corazón.”²⁰⁶ Los altos niveles de manganeso también son peligrosos para los niños pequeños y las mujeres embarazadas.²⁰⁷ “El hierro es un metal pesado potencialmente tóxico. En exceso, puede causar cáncer, enfermedades del corazón y otras enfermedades.”²⁰⁸ Además, se ha demostrado que la corrosión del hierro aumenta la lixiviación de plomo en el agua.²⁰⁹ ²¹⁰ Una muestra de ensayo tomada recientemente en St. Joseph, Los Ángeles, encontró concentraciones superiores a 230 veces el nivel recomendado por la EPA para el hierro en el agua potable.²¹¹

► Implicaciones de la selección de tuberías

De la utilización de tuberías de hierro dúctil surgen problemas adicionales en la calidad de agua. Hay una tendencia a que el



revestimiento de cemento se degrade a partir de agua agresiva y/o altas velocidades y de que se agriete y se rompa durante las conexiones de tomas, la desviación, la instalación y el transporte. La pérdida de revestimiento hace que el agua potable entre en contacto con la pared de la tubería de hierro o el sustrato para el que no hay ninguna prueba de salud y seguridad. Solo el revestimiento de cemento de las tuberías de hierro dúctil revestido está certificado con la norma 61 de NSF/ANSI de “Efectos sobre la salud de los componentes del sistema de agua potable”; el interior de la tubería de hierro no lo está. Además, la campana de la tubería de hierro dúctil no está revestida, lo que añade un riesgo adicional para la salud pública.

A diferencia de las tuberías de concreto y hierro dúctil, las tuberías de PVC no se corroen internamente. El uso de energía con tuberías de PVC se mantendrá constante durante una vida útil de 100 años. Sin embargo, las tuberías de hierro dúctil sufrirán la degradación de las superficies de las paredes internas y estarán propensas a corrosión, roturas y fugas que aumentarán el uso de energía y el costo de bombeo con el tiempo. La tubería de hierro dúctil también tendrá mayores costos de mantenimiento, reparación y sustitución. La mayoría de las tuberías principales no tienen alta presión de agua y, por lo tanto, no necesitan fuerza excesiva para compensar en exceso un sistema mal diseñado u operado. El estudio de roturas en tuberías principales de agua de la Universidad Estatal de Utah informó que la presión media es de 77 psi en los sistemas de distribución de agua municipales a través de América del Norte y que la mayoría de las redes de tuberías de agua no necesitan fuerza excesiva para sus tuberías.²¹² Las tuberías de PVC tienen menor cantidad de roturas en tuberías principales para agua, menos fugas y menores costos de operación y mantenimiento en comparación con las tuberías de hierro dúctil. Esto se traduce en tuberías de PVC que crean una condición de calidad del agua ecológicamente estable y sustentable que protege la salud pública.

Mientras la DIPRA afirma los beneficios y el rendimiento a largo plazo de tuberías más gruesas de hierro fundido, las tuberías de hierro dúctil son significativamente más delgadas y se corroen tanto interna como externamente. Los estudios muestran que la longevidad de las tuberías de hierro está desplomándose debido a reducciones significativas en el espesor de su pared.²¹³ Los factores clave para las personas que toman las decisiones a la hora de seleccionar los materiales de las tuberías son la corrosividad del suelo (los suelos corrosivos afectan el 75 % de la infraestructura de agua de nuestro país)²¹⁴ y el agua agresiva. De acuerdo con un estudio de 2011 realizado por la Fundación de Investigaciones de la AWWA, las tuberías de hierro dúctil con las paredes más delgadas (que representan la mayoría de las tuberías metálicas vendidas) en suelos moderadamente corrosivos tienen una esperanza de vida de tan solo 11 a 14 años.²¹⁵ Las tuberías que fallan prematuramente por la corrosión no son ecológicas ni sustentables. La Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión (NACE, por sus siglas en inglés) no reconoce la envoltura de tuberías de hierro dúctil en plástico como una medida de control de la corrosión.

► La corrosión del hierro (agua oxidada/roja) puede causar la lixiviación de plomo en el agua

El Dr. M. Edwards y el Dr. S. Masters, del Instituto Politécnico y la Universidad Estatal de Virginia, publicaron un artículo titulado *Increased Lead in Water Associated with Iron Corrosion* (Aumento del plomo en el agua asociado con la corrosión del hierro) en 2015 que describe pruebas de agua.²¹⁶ El artículo examina los consumidores que se quejan por agua de color rojo, agua “oxidada” y el aumento general del nivel de plomo. Las quejas llevaron a pruebas intensivas de campo sobre las posibles asociaciones entre mayores partículas de hierro del sistema de distribución y partículas de plomo en las tuberías de la casa. Esto planteó la cuestión de que a veces la corrosión del hierro podría estar ligada fuertemente a la corrosión del plomo. En la medida en que la corrosión de las tuberías de hierro puede aumentar la liberación de plomo, la reducción de plomo en el agua puede requerir actualizaciones a infraestructuras de agua potable no corrosiva o el control de la corrosión del hierro, en contraposición a los enfoques actuales que se centran exclusivamente en la reducción de la solubilidad del plomo.

Hubo una interacción significativa entre el tipo de agua, el pH y la presencia de hierro en la corrosión del plomo. Hubo más de un 150 % más de liberación de plomo con hierro, probablemente debido a la sorción o coprecipitación de plomo sobre las partículas de hierro desprendidas. El agua rica en hierro desemboca en las líneas de servicio de plomo, absorbe el plomo y luego lo libera en los grifos de los consumidores.²¹⁷

► La corrosión del hierro (agua oxidada/roja) puede disminuir los desinfectantes del agua

El cloruro suele considerarse muy corrosivo para el hierro. Por ejemplo, el cloruro presente en las sales de carretera aplicadas en el invierno genera la oxidación del hierro en autos y puentes. Muchas empresas de servicios públicos añaden un producto químico inhibidor de la corrosión (ortofosfato) al agua para ayudar a reducir la corrosión de los metales tales como el hierro y el plomo. La corrosión

del hierro puede causar problemas graves cuando se trata de cumplir con los estándares federales de agua potable debido a que la corrosión del hierro consume el cloro y el cloro es necesario para mantener el agua segura. El alto contenido de hierro en el agua puede eliminar los desinfectantes como el cloro, permitiendo que las bacterias nocivas crezcan y puedan causar enfermedades como la enfermedad del legionario.²¹⁸ El Dr. M. Edwards, del Instituto Politécnico y la Universidad Estatal de Virginia, también sostiene que la corrosión en las tuberías de agua proporciona nutrientes, tales como hierro, que es una fuente de alimento para patógenos como la legionela.²¹⁹

► Efectos en la salud

La exposición al plomo puede causar una serie de efectos en la salud, en especial en niños menores de seis años o mujeres embarazadas. En Flint, Michigan, entre 6.000 y 12.000 niños han estado expuestos a agua potable con altos niveles de plomo. La exposición al plomo puede afectar la capacidad de aprendizaje y causar problemas del comportamiento.²²⁰

El cloro se añade al agua para evitar el crecimiento de microorganismos que causan enfermedades, y mantener cloro residual es la mejor manera de proteger la salud pública frente a los patógenos.

Los municipios con problemas de corrosión y controles químicos inadecuados podrían exponer a sus consumidores a posibles problemas de seguridad y salud pública más allá de la contaminación por plomo. Se cree que el brote de la enfermedad de los legionarios en Flint que mató a diez personas y afectó a 77 se produjo como resultado de no tener cloro residual en las tuberías para continuar el proceso de desinfección.²²¹ Según el Dr. M. Edwards, sin niveles adecuados de inhibidores de la corrosión en el sistema de agua de Flint, las tuberías de hierro lixiviaron altos niveles de hierro, creando condiciones para que las bacterias prosperen y contribuyan al brote de la enfermedad de los legionarios.²²²

FIGURA A.24 : LA CORROSIÓN DEL HIERRO CAUSA AGUA “ROJA” U OXIDADA



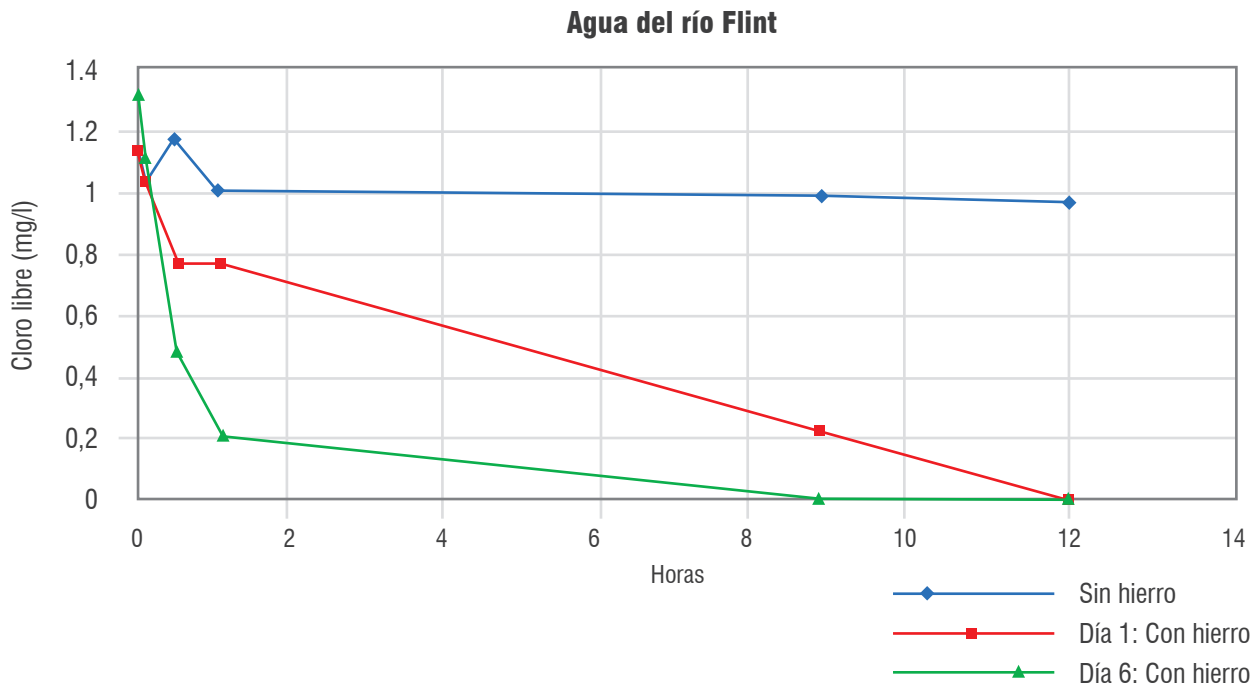
► La corrosión de las tuberías de hierro y los problemas de la calidad del agua en Flint

La corrosión del hierro hace que el agua tenga un color rojo/oxidado. En Flint, Michigan, los residentes se habían quejado por agua “roja” o de color anormal. Consulte la Figura A.24 para ver un ejemplo de agua potable de Flint afectada por la corrosión y la Figura A.25 para ver ejemplos de tuberías de hierro para aguas corroídas, desenterradas en Flint.²²³ El hierro en el agua puede hacer que sea difícil para los municipios cumplir con los estándares federales debido a que la corrosión del hierro consume el cloro y eso hace que sea más probable que las bacterias crezcan en el agua. Es posible que, con el sistema existente de tuberías de hierro sin revestimiento en Flint y la demanda de agua relativamente baja (debido a la disminución de la población y la pérdida de negocios), sea muy difícil cumplir con las normas federales de niveles mínimos de cloro, independientemente de lo que se haga para tratar el agua.²²⁴ Consulte la Figura A.26 para ver un ejemplo de cómo los niveles de cloro disminuyen cuando se exponen al hierro.²²⁵

FIGURA A.25 : MUESTRAS DE TUBERÍAS CORROÍDAS DE HIERRO DE FLINT, MICHIGAN



FIGURA A.26 : DESCOMPOSICIÓN DEL CLORO LIBRE EN AGUA DEL RÍO FLINT CON Y SIN HIERRO



► El pH del agua de origen puede cambiar

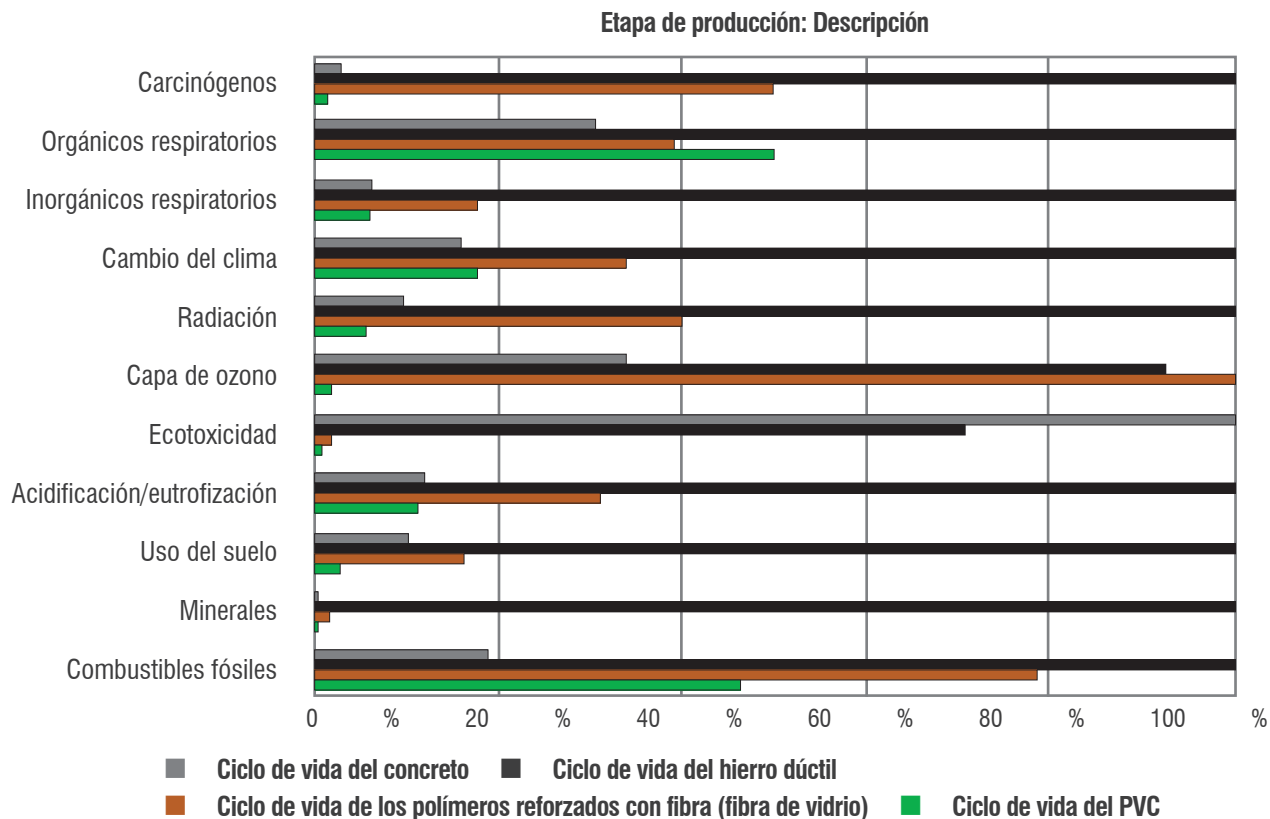
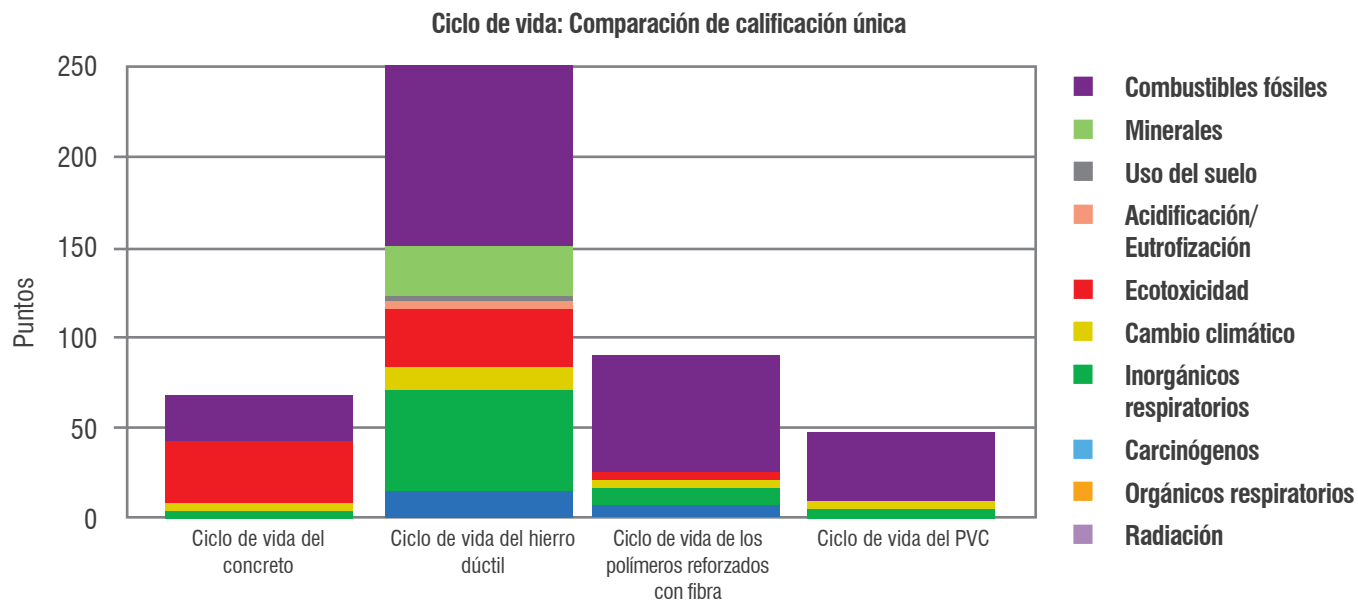
Algunas aguas naturales de origen que contienen calcio y carbonato en presencia de manganeso y hierro pueden producir una película protectora sobre la superficie de la tubería de hierro. Sin embargo, la formación y la estabilidad de la película pueden verse fácilmente comprometidas con la presencia de ácidos y producir corrosión localizada.²²⁶ El agua puede volverse ácida en una variedad de maneras, incluso un aumento de los niveles de CO_2 , agua estancada y exceso de cloro.²²⁷ El agua puede someterse a hidrólisis para formar ácido clorhídrico e hipocloroso. Este proceso reduce el pH, elimina cualquier capa protectora sobre una superficie metálica e inicia la corrosión por picadura. La temperatura estacional, la disminución del uso del agua y las condiciones cambiantes también pueden conducir a corrosión.²²⁸

ESTUDIO DE CASO COMPARATIVO DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LAS TUBERÍAS DE ALCANTARILLADO

Se publicó un estudio independiente que utiliza un análisis del ciclo de vida para analizar el rendimiento medioambiental de cuatro materiales diferentes de tuberías en la infraestructura del transporte de aguas residuales. Este estudio fue publicado en 2015 por Procedia Engineering y llevado a cabo por la Universidad de Purdue como el *Comparative Life Cycle Analysis of Materials in Wastewater Piping System* (Análisis comparativo del ciclo de vida de los materiales en los sistemas de tuberías de aguas residuales).

“Se realizó un estudio comparativo de las etapas de producción de diferentes materiales de tuberías y los resultados obtenidos se muestran en la [Figura A.27]. Para el estudio se eligió específicamente la etapa de producción ya que esta fase tuvo el impacto máximo para, literalmente, los cuatro materiales. La figura saca a la luz el impacto de la etapa de producción de los cuatro materiales (hierro dúctil, concreto, polímeros reforzados con fibra [“FRP”, por sus siglas en inglés] y PVC) en diferentes categorías medioambientales y están representados en una escala de porcentaje. Se descubrió que la etapa de producción del hierro dúctil es la más perjudicial, lo que afecta a casi todas las categorías en la mayor medida, a excepción de la ecotoxicidad, que se vio más afectada por la etapa de producción del concreto. A pesar del hecho de que la etapa de producción del hierro dúctil tiene un impacto perjudicial considerable en el agotamiento de la capa de ozono, y como en la producción de tuberías de polímeros reforzados con fibra se utiliza poliestireno y durante el proceso se generan hidroclorofluorocarbonos (HCFC), la etapa de producción de los polímeros reforzados con fibra se considera como la etapa más impactante en el agotamiento de la capa de ozono. La producción de tuberías de polímeros reforzados con fibra y de PVC también afectó el medioambiente, pero no tanto como el hierro dúctil”.²²⁹

Entre los cuatro tipos de tuberías analizados por la Universidad de Purdue, el hierro dúctil tiene los efectos ambientales y sanitarios máximos, mientras que el PVC tiene los más bajos, como se ve en la Figura A.28. En particular, el hierro dúctil obtuvo la mayor puntuación de todos los materiales en la producción de carcinógenos. Este estudio es consistente con los resultados del *Life Cycle Assessment of PVC Water and Sewer Pipe and Comparative Sustainability Analysis of Pipe Materials* (Análisis del ciclo de vida de tuberías de PVC para agua y alcantarillado, y análisis comparativo de la sustentabilidad de los materiales de las tuberías).

FIGURA A.27 : GRÁFICO QUE DESCRIBE LA COMPARACIÓN DEL CICLO DE VIDA DE TODOS LOS MATERIALES PARA TUBERÍAS**FIGURA A.28 : GRÁFICO DE CALIFICACIÓN ÚNICA PARA LA COMPARACIÓN DEL CICLO DE VIDA DE TODOS LOS MATERIALES DE LAS TUBERÍAS**

REFERENCIAS

- 1 Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. "A Handbook for Water and Wastewater Utilities" (Manual para empresas de servicios de agua y aguas residuales). <http://water.epa.gov/infrastructure/sustain/upload/EPA-s-Planning-for-Sustainability-Handbook.pdf>.
- 2 Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. Programa Nacional del Agua: Cambio climático; medidas para 2015. Junio de 2015. Washington DC.
- 3 NSF International. "Environmental Product Declaration" (Declaración de producto ambiental). Según la norma ISO 14025. 15 de mayo de 2015. Pág. 22.
- 4 Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. "Permeation and Leaching" (Infiltración y lixiviación). AWWA. (2002). Pág. 10.
- 5 Walter, R. K.; Lin, P. H.; Edwards, M.; Richardson, R. E. "Investigation of Factors Affecting the Accumulation of Vinyl Chloride in Polyvinyl Chloride Piping Used in Drinking Water Distribution Systems" (Investigación de factores que afectan la acumulación de cloruro de vinilo en tuberías de cloruro de polivinilo utilizadas en los sistemas de distribución de agua potable). *Water Research* 45, no. 8 (2011): 2607-2615.
- 6 Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (ATSDR, por sus siglas en inglés). "Toxicological Profile for Vinyl Chloride" (Perfil toxicológico del cloruro de vinilo). *Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE. UU., Servicio de Salud Pública*. (2006). Pág. 188.
- 7 "Buried No Longer: Confronting America's Water Infrastructure Challenge" (Enterradas nunca más: hacer frente al desafío de las infraestructuras de agua de los EE. UU.). AWWA. Denver, CO. (2012).
- 8 Anderson, R. "Municipal Procurement: Procurement Process Improvements Yield Cost-Effective Public Benefits" (Contratación municipal: mejoras en el proceso de compras producen beneficios públicos rentables). *U.S. Conference of Mayors*. Washington DC. (2013).
- 9 Burn, S.; Davis, P.; Schiller, T.; Tiganis, B. y Tjandraatmadja, G. "Long-Term Performance Prediction for PVC Pipes" (Predicción de rendimiento a largo plazo para tuberías de PVC). *Fundación de Investigaciones de la AWWA*. (2005).
- 10 Alferink, F.; Janson, L. E.; Holloway, L.; "Old PVC-U Water Pressure Pipes: Investigation into Design and Durability" (Viejas tuberías de presión de PVC-U para agua: investigación del diseño y la durabilidad). *Actas de Ponencias de 1996 sobre el PVC*, 42C382 Institute of Materials, Brighton, Inglaterra, abril de 1996, pag. 87-96.
- 11 Kirby, P. C. "PVC Pipe Performance in Water Mains and Sewers" (Rendimiento de tuberías de PVC en tuberías principales de agua y alcantarillado). *Conferencia Internacional sobre Tuberías Subterráneas de Plástico*. ASCE. Nueva Orleans, LA. Marzo de 1981.
- 12 Folkman, S. "Expected Life of PVC Pipe" (Vida estimada de las tuberías de PVC). Carta a Albert Thomas, Bharadwaj R. K. Mantha y Carol C. Menassa. *Universidad de Utah*. 22 de julio de 2016. http://static1.squarespace.com/static/56748c1d25981d39ea27bed/t/57aa38072e69cf19b9780c38/1470773256007/Expected_Life_of_PVC_Pipe.pdf.
- 13 Baird, G. M. "Reforming Our Nation's Approach to the Infrastructure Crisis: How Competition, Oversight, and Innovation Can Lower Water and Sewer Rates in the U.S" (Reforma del enfoque de nuestra nación a la crisis de infraestructuras: de qué manera la competencia, la supervisión y la innovación pueden bajar las tasas de agua y alcantarillado en los EE. UU.). *National Taxpayers Union*. (Abril de 2013).
- 14 Water Main Break Clock. <http://www.watermainbreakclock.com/>.
- 15 "U.S. Municipal Water Infrastructure: Utility Strategies & CAPEX Forecasts, 2016-2025" (Infraestructura municipal de agua de los EE. UU.: estrategias de servicios públicos y pronósticos CAPEX, 2016-2025). <http://bluefieldresearch.com/research/municipal-water-capex/>. (Consultado el 15 de julio de 2016).
- 16 Uni-Bell PVC Pipe Association. "Handbook of PVC Pipe Design and Construction" (Manual de diseño y construcción de tuberías de PVC). *Industrial Press, Inc.* Diciembre de 2012.
- 17 Esta introducción se basa en normas internacionales de la serie ISO-14040, Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida.
- 18 UL Environment. "Addendum Product Category Rules for Preparing an Environmental Product Declaration for PCR: Piping Systems for use for Sewage and Storm Water (Under Gravity)" (Apéndice de las reglas de categoría de productos para preparar una declaración de producto ambiental para PCR: sistemas de tuberías para aguas residuales y aguas pluviales [por gravedad]). Versión 2. 10 de junio de 2014.
- 19 NSF International. "NSF International Verifies First Environmental Product Declaration for PVC Water and Sewer Pipes" (NSF International verifica la primera declaración de producto ambiental para tuberías de PVC para agua y alcantarillado). 19 de mayo de 2015. <http://www.nsf.org/newsroom/nsf-international-verifies-first-environmental-product-declaration-for-wate>.

- 20 Instituto de materiales sustentables Athena. "LCA, LCI, LCIA, LCC: What's the Difference?" (LCA, LCI, LCIA, LCC: ¿cuál es la diferencia?). <http://www.athenasmi.org/resources/about-lca/whats-the-difference/>. (Consultado el 30 de noviembre de 2014).
- 21 Water Environment & Reuse Foundation. "Life Cycle Costing" (Cálculo del costo del ciclo de vida). <http://simple.werf.org/simple/media/LCCT/index.html>. (Consultado el 30 de noviembre de 2014).
- 22 Marangoni, A. "PVC Products Competitiveness. A Total Cost of Ownership Approach" (Competitividad de productos de PVC. Un enfoque al costo total de propiedad). Bruselas, Bélgica. 2011.
- 23 UL Environment. "Piping Systems for Use for Sewage and Storm Water (Under Gravity)" (Sistemas de tuberías para aguas residuales y aguas pluviales). *The Norwegian EPD Foundation*, con Apéndice v2. Septiembre de 2012. Apéndice de junio de 2014.
- 24 Tuberías Iplex. "Environmental Product Declaration (EPD) PVC Pressure Pipes" (Declaración de producto ambiental [EPD, por sus siglas en inglés] para tuberías de presión de PVC). Cumplimiento de conformidad con la norma ISO 14025 y EN 15804 Versión 1.10. Fecha de aprobación 12 de junio de 2015.
- 25 Comunicado de prensa del IPCC. 27 de septiembre de 2013. http://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/ar5/press_release_ar5_wgi_en.pdf.
- 26 Instituto de Revestimientos de Vinilo. "Environmental Product Declaration. Vinyl Siding Industry Average" (Declaración de producto ambiental. Promedio de la industria de revestimientos de vinilo). Según la norma ISO 14025.
- 27 Krock, R., Middleton, G. "The Role of PVC Resins in Sustainable Design" (El papel de las resinas de PVC en el diseño sustentable). *The Vinyl Institute*. ANTEC 2013.
- 28 Krock, Middleton. Pág. 2760.
- 29 "An Inventory of Sources and Environmental Releases of Dioxin-Like Compounds in the U.S. for the Years 1987, 1995, and 2000 (Final, Nov. 2006)" (Un inventario de las fuentes y las emisiones ambientales de compuestos similares a las dioxinas en los EE. UU. durante los años 1987, 1995 y 2000 [Final, noviembre de 2006]). *Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU.* Washington DC, EPA/600/P-03/002F.
- 30 Davidson, Lee. "U.S. Magnesium Still 'Worst Polluter'" (El magnesio de los EE. UU. continúa siendo el "peor contaminante"). *Deseret News*. 22 de enero de 2003. <http://www.deseretnews.com/article/960632/US-Magnesium-still-worst-polluter.html?pg=all>. (Consultado el 2 de julio de 2016).
- 31 Reevaluación de las dioxinas del proyecto de revisión de la NAS. Capítulo 7. https://cfpub.epa.gov/ncea/iris_drafts/dioxin/nas-review/pdfs/part1_vol1/dioxin_pt1_vol1_ch07_dec2003.pdf. (Consultado el 3 de diciembre de 2013).
- 32 Oehme, M., Manø, S., Bjerke, B. "Formation of Polychlorinated Dibenzofurans and Dibenzo-P-Dioxins by Production Processes for Magnesium and Refined Nickel" (Formación de dibenzofuranos policlorados y dibenzo-p-dioxinas de los procesos de producción para magnesio y níquel refinado). *Chemosphere* 18, no. 7-8 (1989): 1379-1389.
- 33 UNEP. "Toolkit for Identification and Quantification of Releases of Dioxins, Furans and Other Unintentional PoPs under Article 5 of the Stockholm Convention" (Herramienta para la identificación y cuantificación de liberaciones de dioxinas, furanos y otros compuestos orgánicos persistentes liberados accidentalmente en virtud del artículo 5 de la Convención de Estocolmo). Enero de 2013. <http://toolkit.pops.int/Publish/Downloads/UNEP-POPS-TOOLKIT-2012-En.pdf>.
- 34 Wilson, Alex. "What USGBC's PVC Report Means for GreenSpec" (Qué significa el informe de PVC de USGBC para GreenSpec). *Building Green*. 5 de abril de 2007. <https://www.buildinggreen.com/op-ed/what-usgbc-pvc-report-means-greenspec>. (Consultado el 13 de diciembre de 2013).
- 35 "TRI Data and Tools" (Datos y herramientas del programa de inventario de emisiones tóxicas). *Programa de inventario de emisiones tóxicas (TRI)*. <https://www.epa.gov/toxics-release-inventory-tri-program/tri-data-and-tools>.
- 36 "National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Iron and Steel Foundries" (Normas nacionales de emisión de contaminantes atmosféricos peligrosos para fundiciones de hierro y acero). 22 de abril de 2004. Pág. 21906.
- 37 Jones, A. J. "The Industrial Ecology of the Iron Casting Industry" (La ecología industrial de la industria de la fundición de hierro). *Debate filosófico, Instituto Tecnológico de Massachusetts*. (2007). <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/39876/181655903-MIT.pdf?sequence=2>.
- 38 Cannon, F., et al., "Use of Advanced Oxidation Technology for Emissions and Materials Reduction at Foundries" (El uso de la tecnología de la oxidación avanzada para la reducción de emisiones y materiales en fundiciones). *Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU.* (2005).
- 39 Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. "Emission Factors for Iron Foundries—Criteria and Toxic Pollutants" (Factores de emisión para fundiciones de hierro: criterios y contaminantes tóxicos). 1990. EPA-600/2-90-044.
- 40 Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. "Compilation of Air Pollutant Emissions Factors: Stationary Point and Area Sources AP 42" (Recopilación de factores de emisiones de contaminantes del aire: punto fijo y fuentes del área AP42). 5.ª edición. <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>. (Consultado el 28 de enero de 2015).
- 41 Munoz, G. R., Marta A. P. "Pollution Prevention and Management Strategies for Dioxins in the New York/New Jersey Harbor" (Prevención de la contaminación y estrategias de gestión para las dioxinas en el puerto de Nueva York/Nueva Jersey). *Academia de Ciencias de Nueva York*. 2006; Dwain Winters. Proyecto de política para la dioxina. Sede de la EPA.
- 42 "Guidance for the Identification and Control of Safety and Health Hazards in Metal Scrap Recycling" (Guía para la identificación y el control de la seguridad y los peligros sanitarios en el reciclaje de chatarra). *Administración de Salud y Seguridad Ocupacional, Departamento de Trabajo de los EE. UU.* Washington DC. (2008). <https://www.osha.gov/Publications/OSHA3348-metal-scrap-recycling.pdf>.

- 43 "General Procedure for Removing Mercury Switches from Vehicles" (Procedimiento general para la eliminación de interruptores de mercurio de los vehículos). General Scrap Partnership. (2008). <http://generalscrappartnership.com/mercury%20bounty/Mercury%20Switches%20in%20Vehicles.pdf>.
- 44 Jones, A. J. "The Industrial Ecology of the Iron Casting Industry" (La ecología industrial de la industria de la fundición de hierro). *Debate filosófico*, Instituto Tecnológico de Massachusetts. (2007). <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/39876/181655903-MIT.pdf?sequence=2>.
- 45 "The Manufacturing Process" (El proceso de fabricación). Duktus. <http://www.duktus.com/en/the-world-of-ductile-cast-iron-pipes/the-manufacturing-process.html>. (Consultado el 28 de enero de 2015).
- 46 Hoss, G. "How it's Made: Ductile Iron Pipe" (Cómo está hecho: tuberías de hierro dúctil). Temporada 7, Episodio 5. Discovery Channel. 2007.
- 47 Eppich, R. E. "Energy Use in Selected Metalcasting Facilities - 2003" (Uso de energía en instalaciones seleccionadas de fundición de metal - 2003). Departamento de Energía, Eficiencia Energética y Energía Renovable de los EE. UU. Mayo de 2004.
- 48 VinylPlus. "PVC Recycling Technologies" (Tecnologías para el reciclado de PVC). Pág. 11, 19. <http://www.vinylplus.eu/uploads/Modules/Documents/2015-04-20-pvc-recycling-brochure---english.pdf>.
- 49 Welling, S.; Sinha, S.; Baird, G. M.; Feeney, C.; Galleher, J.; Rothermich, T.; Sorenson, E. "Cost Information for Drinking Water Pipelines Synthesis Report" (Información de costos para el informe de la síntesis de las tuberías de agua potable). *Water Environment Research Foundation*. (2013).
- 50 Verlaan, Peter. "30% 'Installation Time' Saving When Using a Plastics Sewer System" (Ahorro de un 30 % en el tiempo de instalación al usar un sistema de alcantarillado de plástico). Actas de la XVII Conferencia sobre Tuberías Plásticas - PPXVII. Chicago, IL. Septiembre de 2014. http://www.thinkpipesthinkpvc.com.au/images/pdfs/17_Plastic_Pipe_Conference/Zoran_DAVIDOVSKI_Sewer_Installation_Time__Comparing_PVC_with_concrete_1.pdf. (Consultado el 13 de enero de 2016).
- 51 Stahmer, M. W.; Whittle, A. J. "Long Term Performance of PVC Pressure Pipes in a Large Rural Water Supply Scheme" (Rendimiento a largo plazo de tuberías de presión de PVC en un esquema grande de abastecimiento de agua rural). XI Conferencia sobre Tuberías Plásticas. Munich, Alemania. Septiembre de 2001.
- 52 Whittle, A. J.; Tennakoon, J. "Predicting the Residual Life of PVC Sewer Pipes" (Predicción de la vida residual de las tuberías de PVC para alcantarillado). *Plastics, Rubber and Composites* 34, no. 7 (2005): 311-317.
- 53 Rockaway, T.D, et al. "Performance of Elastomeric Components in Contact with Potable Water" (Rendimiento de los componentes elastoméricos en contacto con agua potable). *Fundación de Investigaciones de la AWWA*. (2007).
- 54 Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. "Using DWSRF Funds for Transmission and Distribution Infrastructure Needs" (Uso de fondos del DWSRF para las necesidades de infraestructura de transmisión y distribución). Febrero de 2003.
- 55 Water Environment & Reuse Foundation. "Overview – What is 'Remaining Effective Life?'" (Resumen: ¿qué es la vida efectiva restante?). <http://simple.werf.org/simple/media/RELT/index.html>.
- 56 Cityworks. "Asset Management" (Gestión de activos). <http://www.cityworks.com/products/what-is-cityworks/asset-management/>.
- 57 The Institute for Public Procurement. "Public Procurement Practice: Performance Based Contracting" (Práctica de contratación pública: contratación basada en el rendimiento). 2012. <http://www.nigp.org/docs/default-source/New-Site/global-best-practices/performancebased.pdf?sfvrsn=2>.
- 58 Narasimhan H., Chew M.Y.L. "Integration of Durability with Structural Design: an Optimal Life Cycle Cost Based Design Procedure for Reinforced Concrete Structures" (Integración de la durabilidad con el diseño estructural: un procedimiento de diseño basado en el costo óptimo del ciclo de vida para estructuras de concreto reforzado). *Construction and Building Materials* 23, no. 2 (2009): 918-929.
- 59 Farshad, M. "Plastic Pipe Systems: Failure Investigation and Diagnosis" (Sistema de tuberías de plástico: investigación de fallos y diagnóstico). Vol. 407. Elsevier. 2011.
- 60 St. Clair, A. M. "Development of a Novel Performance Index and a Performance Prediction Model for Metallic Drinking Water Pipelines" (Desarrollo de un índice novedoso de rendimiento y un modelo de predicción de rendimiento para tuberías metálicas de agua potable). *Instituto Politécnico y Universidad Estatal de Virginia*. (2013).
- 61 Beale, D.; Tran, D.; Gould S.; Lane, B.; Marlow, D. "Practical Tool for Deciding Rehabilitation Techniques for Cast Iron Pipes – Literature Review" (Herramienta práctica para decidir las técnicas de rehabilitación para tuberías de hierro fundido: revisión de bibliografía). *Fundación de Investigación del Agua y CSIRO*. (2011).
- 62 Folkman, S. "PVC Pipe Longevity Report: Affordability & The 100+ Year Benchmark Standard. A Comprehensive Study on PVC Pipe Excavation's, Testing & Life Cycle Analysis" (Informe de longevidad de tuberías de PVC: asequibilidad y norma para estudio comparativo para más de 100 años. Un estudio exhaustivo sobre excavaciones, pruebas y análisis del ciclo de vida de las tuberías de PVC). *Laboratorio de Estructuras Subterráneas de la Universidad Estatal de Utah*. (2014).
- 63 Hulsman, T., Nowack, R. "70 Years of Experience with PVC Pipes" (70 años de experiencia con tuberías de PVC). Simposio Mundial de Tuberías. Milán, Italia. (2004).
- 64 Whittle, A. J.; Tennakoon, J. "Predicting the Residual Life of PVC Sewer Pipes" (Predicción de la vida residual de las tuberías de PVC para alcantarillado). *Plastics, Rubber and Composites* 34, no. 7 (2005): 311-317.
- 65 Alferink, F.; Guldbaek, E.; Grootoonk, J. "Old PVC Gravity Sewer Pipes: Long Term Performance" (Tuberías por gravedad de PVC viejas: rendimiento a largo plazo). Actas de la IX Conferencia sobre Tuberías Plásticas. Edimburgo, Escocia. (1995). Pág. 40-51.

- 66 Thomson, J. C. "An Examination of Innovative Methods used in the Inspection of Wastewater Systems" (Un examen de los métodos innovadores utilizados en la inspección de sistemas de aguas residuales). *Water Environment & Reuse Foundation*. (2004). Pág. ES-9.
- 67 "Optimizing Public Agency Purchasing Power" (Optimización del poder de compra de los organismos públicos). *Asociación Nacional de Agencias de Agua Limpia* (anteriormente la Asociación de Agencias Metropolitanas de Alcantarillado cuando se publicó el informe) y *Asociación de Fabricantes de Equipos para Agua y Aguas Residuales*. Washington, DC. https://www.wwema.org/files/optimizing_public_agency_purchasing_power.pdf.
- 68 Masters, S.; Edwards, M. "Increased Lead in Water Associated with Iron Corrosion" (Aumento del plomo en el agua asociado con la corrosión del hierro). *Environmental Engineering Science* 32, no. 5 (2015): 361-369.
- 69 Folkman, S. "Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study" (Tasas de roturas de tuberías principales de agua en los EE. UU. y Canadá: un estudio integral). *Laboratorio de Estructuras Subterráneas de la Universidad Estatal de Utah*. (2012).
- 70 Brailey, D.; Jacobs, A. "Energy Management in the Waterworks Industry" (Gestión de la energía en la industria del abastecimiento de agua). *Journal of New England Water Works Association* 94, no. 3 (1980).
- 71 Folkman S.; Rice J.; Sorenson, A.; Braithwaite, N. "Survey of Water Main Failures in the United States and Canada" (Encuesta sobre fallos en tuberías principales de agua en los EE. UU. y Canadá). *Journal American Water Works Association* 104, no. 10 (2012): 70-79.
- 72 Cohen, B. R. "Fixing America's Crumbling Underground Water Infrastructure" (Arreglo de la deteriorada infraestructura subterránea del agua de los Estados Unidos). *Competitive Enterprise Institute*. (2012). Pág. 6.
- 73 Paradkar, A. B. "An Evaluation of Failure Modes for Cast Iron and Ductile Iron Water Pipes" (Una evaluación de los modos de fallo para tuberías de agua de hierro fundido y hierro dúctil). *Universidad de Texas en Arlington*. (2012). Pág. 58.
- 74 National Research Council. "Review of the Bureau of Reclamation's Corrosion Prevention Standards for Ductile Iron Pipe" (Revisión de las normas de prevención de la corrosión para tuberías de hierro dúctil de la Oficina de Reclamación). *National Academies Press*. (2009).
- 75 Rajani, B.; Kleiner, Y.; Kryas, D. "Long-Term Performance of Ductile Iron Pipes" (Rendimiento a largo plazo de las tuberías de hierro dúctil). *Fundación de Investigación del Agua*. (2011). Pág. 103.
- 76 "Coatings Manual. Appendix A: Basics on Corrosion in Wastewater Collection and Treatment Systems: The Corroding Environments and Materials" (Manual de revestimientos. Apéndice A: Fundamentos de la corrosión en los sistemas de recolección y tratamiento de agua residual: entornos y materiales de corrosión). *Hampton Roads Sanitation District*. <http://www.hrsd.com/pdf/Coatings%20Manual/2011/APPENDIX%20A.pdf>. (Consultado el 1° de julio de 2016).
- 77 Bueno, S. M. "What Lies Underground? Trenchless Technology Polls Municipalities on Sewer Pipe Usage" (¿Qué hay bajo la tierra? Los municipios realizan encuestas sobre tecnología sin zanja para el uso de tuberías de alcantarillado). *Trenchless Technology 2010 Pipe Materials Guide*. (2010): P8-11. http://www.trenchlessonline.com/pdfs/2010_Pipe_Materials_Guide.pdf.
- 78 Anderson, R. "Municipal Procurement: Procurement Process Improvements Yield Cost-Effective Public Benefits" (Contratación municipal: mejoras en el proceso de compras producen beneficios públicos rentables). *U.S. Conference of Mayors*. Washington DC. (2013).
- 79 "pH -- Water Properties" (ph: propiedades del agua). Encuesta Geológica de los EE. UU. <http://water.usgs.gov/edu/ph.html>.
- 80 Krieger, Nick. "What Makes Flint River Water So Corrosive?" (¿Por qué el agua del río Flint es tan corrosiva?). *Fix the Mitten*. 27 de septiembre de 2015. <http://www.fixthemitten.com/blog/what-makes-flint-river-water-so-corrosive>.
- 81 Paradkar, A. B. "An Evaluation of Failure Modes for Cast Iron and Ductile Iron Water Pipes" (Una evaluación de los modos de fallo para tuberías de agua de hierro fundido y hierro dúctil). *Universidad de Texas en Arlington*. (2012). Pág. 14.
- 82 Cochran, T. "Report Prepared for the Conference of Mayors Winter Leadership Meeting Regarding the Flint Water Crisis" (Informe preparado por la reunión de liderazgo de invierno de Conference of Mayors con respecto a la crisis del agua en Flint). *U.S. Conference of Mayors*. 18 de febrero de 2016.
- 83 "Detroit Water Master Plan" (Plan maestro de agua de Detroit). Apéndice H. *Autoridad del Agua de los Grandes Lagos*. 2015. http://www.glwater.org/wp-content/documents/procurement/masterplan_freshwater/task_c_appendix_h/C-Factor_Projections.pdf.
- 84 St. Clair, A. M. "Development of a Novel Performance Index and a Performance Prediction Model for Metallic Drinking Water Pipelines" (Desarrollo de un índice novedoso de rendimiento y un modelo de predicción de rendimiento para tuberías metálicas de agua potable). *Instituto Politécnico y Universidad Estatal de Virginia*. (2013).
- 85 "Detroit Water Master Plan" (Plan maestro de agua de Detroit). Apéndice H. *Autoridad del Agua de los Grandes Lagos*. 2015. http://www.glwater.org/wp-content/documents/procurement/masterplan_freshwater/task_c_appendix_h/C-Factor_Projections.pdf.
- 86 American Water Works Service Co., Inc. "Deteriorating Buried Infrastructure Management Challenges and Strategies" (Gestión, desafíos y estrategias para el deterioro de las infraestructuras subterráneas). *Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU.* Washington DC. (Mayo de 2002). Pág. 4.
- 87 IPEX. "Hydraulics of PVC Pipe" (Hidráulica de las tuberías de PVC). *Technical Information Bulletin*.
- 88 Neale, L. C.; Price, R. E. "Flow Characteristics of PVC Sewer Pipe" (Características del flujo de las tuberías de PVC para alcantarillado). *Journal of the Sanitary Engineering Division* 90, no. 3 (1964): 109-132.
- 89 Uni-Bell PVC Pipe Association. "Handbook of PVC Pipe Design and Construction" (Manual de diseño y construcción de tuberías de PVC). *Industrial Press, Inc.* Diciembre de 2012.
- 90 "M23 PVC Pipe -- Design and Installation" (Tuberías de PVC M23: diseño e instalación). *American Water Works Association*. Segunda edición. 2002.

- 91 St. Clair, A. M. "Development of a Novel Performance Index and a Performance Prediction Model for Metallic Drinking Water Pipelines" (Desarrollo de un índice novedoso de rendimiento y un modelo de predicción de rendimiento para tuberías metálicas de agua potable). Instituto Politécnico y Universidad Estatal de Virginia. (2013).
- 92 Recio, J., Guerrero, P., Ageitos, M., Narvaez, R. "Estimate of Energy Consumption and CO₂ Emission Associated with the Production, Use and Final Disposal of PVC, HDPE, PP, Ductile Iron and Concrete Pipes" (Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ asociados con la producción, el uso y la disposición final de tuberías de PVC, polietileno de alta densidad, polipropileno, hierro dúctil y concreto). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. (Diciembre de 2005). <http://www.pvc4pipes.com/images/pdfs/Univ-Catalunya-pipes-energy-study-2005.pdf>.
- 93 St. Clair, A. M. "Development of a Novel Performance Index and a Performance Prediction Model for Metallic Drinking Water Pipelines" (Desarrollo de un índice novedoso de rendimiento y un modelo de predicción de rendimiento para tuberías metálicas de agua potable). Instituto Politécnico y Universidad Estatal de Virginia. (2013).
- 94 Piratla, K. R.; Ariaratnam, S. T.; Cohen, A. "Estimation of CO₂ Emissions from the Life Cycle of a Potable Water Pipeline Project". (Estimación de emisiones de CO₂ del ciclo de vida de un proyecto de tuberías para agua potable). *Journal of Management in Engineering* 28, no. 1 (2011): 22-30.
- 95 Du, F., Woods, G. J., Kang, D., Lansey, K. E.; Arnold, R. G. "Life Cycle Analysis for Water and Wastewater Pipe Materials" (Análisis del ciclo de vida de los materiales de tuberías de agua y aguas residuales). *Journal of Environmental Engineering* 139, no. 5 (2012): 703-711.
- 96 Baird, G. M. "Reforming Our Nation's Approach to the Infrastructure Crisis: How Competition, Oversight, and Innovation Can Lower Water and Sewer Rates in the U.S" (Reforma del enfoque de nuestra nación a la crisis de infraestructuras: de qué manera la competencia, la supervisión y la innovación pueden bajar las tasas de agua y alcantarillado en los EE. UU.). *National Taxpayers Union*. (Abril de 2013).
- 97 Baird, G. M. Pág. 8.
- 98 Meland, I. S. "Durability of Mortar Linings in Ductile Iron Pipes" (Durabilidad de revestimientos de mortero en tuberías de hierro dúctil). Consejo Nacional de Investigación de Canadá. (1999).
- 99 American Concrete Pressure Pipe Association. "Lessons Learned from Iron Pipe – Volume 6" (Lecciones aprendidas sobre tuberías de hierro - Volumen 6) (Inédito).
- 100 Spickelmire, W. "Corrosion Control Considerations for Ductile Iron Pipe – A Consultant's Perspective" (Consideraciones para el control de la corrosión de las tuberías de hierro dúctil: la perspectiva de un consultor). Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión. 57.º curso corto anual internacional sobre corrosión subterránea en los Apalaches. (Mayo de 2012); Prosser, M. E.; Speight, V. L.; Filion, Y. R. "Life-Cycle Energy Analysis of Performance-Versus Age-Based Pipe Replacement Schedules" (Análisis de la energía del ciclo de vida de los programas de reemplazo de tuberías basados en el rendimiento en comparación con los basados en la edad). *Journal American Water Works Association* 105 (2013): E721-E732.
- 101 Romanoff, M. "Exterior Corrosion of Cast-Iron Pipe" (Corrosión exterior de las tuberías de hierro fundido). *Journal American Water Works Association* 56, no. 9 (1964): 1129-1143. <http://www.awwa.org/publications/journal-awwa/abstract/articleid/29324541.aspx>; Romanoff, M. "Results of National Bureau of Standards Corrosion Investigations in Disturbed and Undisturbed Soils" (Resultados de las investigaciones de la corrosión de la Oficina Nacional de Normas en suelos alterados o no). Boletín técnico N.º 86. Presentado en el XII curso corto anual internacional sobre corrosión subterránea en los Apalaches. (1967).
- 102 Gerhold, W. F. "Corrosion Behavior of Ductile Cast-Iron Pipe in Soil Environments" (Comportamiento de la corrosión de tuberías de hierro fundido dúctil en el suelo). *Journal American Water Works Association* 68, no. 12 (1976): 674-678. <http://www.awwa.org/publications/journal-awwa/abstract.aspx?articleid=10214>.
- 103 Bonds, R. W.; Barnard, L. M.; Horton, A. M.; Oliver, G. L. "Corrosion and Corrosion Control of Iron Pipe: 75 Years of Research" (Corrosión y control de la corrosión en tuberías de hierro: 75 años de investigación). *Journal American Water Works Association* 97, no. 6 (2005): 88-98. <http://www.awwa.org/publications/journal-awwa/abstract.aspx?articleid=15256>.
- 104 American Concrete Pressure Pipe Association. "Lessons Learned from Iron Pipe" (Lecciones aprendidas sobre tuberías de hierro). Volúmenes 1-6. (Inédito).
- 105 Baird, G. M. "Reforming Our Nation's Approach to the Infrastructure Crisis: How Competition, Oversight, and Innovation Can Lower Water and Sewer Rates in the U.S" (Reforma del enfoque de nuestra nación a la crisis de infraestructuras: de qué manera la competencia, la supervisión y la innovación pueden bajar las tasas de agua y alcantarillado en los EE. UU.). *National Taxpayers Union*. (Abril de 2013).
- 106 Anderson, R. "Municipal Procurement: Procurement Process Improvements Yield Cost-Effective Public Benefits" (Contratación municipal: mejoras en el proceso de compras producen beneficios públicos rentables). U.S. Conference of Mayors. Washington DC. (2013).
- 107 Baird, G. M. "Reforming Our Nation's Approach to the Infrastructure Crisis: How Competition, Oversight, and Innovation Can Lower Water and Sewer Rates in the U.S" (Reforma del enfoque de nuestra nación a la crisis de infraestructuras: de qué manera la competencia, la supervisión y la innovación pueden bajar las tasas de agua y alcantarillado en los EE. UU.). *National Taxpayers Union*. (Abril de 2013).
- 108 Paradkar, A. B. "An Evaluation of Failure Modes for Cast Iron and Ductile Iron Water Pipes" (Una evaluación de los modos de fallo para tuberías de agua de hierro fundido y hierro dúctil). Universidad de Texas en Arlington. (2012). Pág. 59.
- 109 Rossum, J. "Prediction of Pitting Rates in Ferrous Metals from Soil Parameters" (Predicción de las tasas de picado en metales ferrosos a partir de los parámetros del suelo). *Journal American Water Works Association*. (Junio de 1969). Pág. 305.
- 110 O'Day, D. K. "Organizing and Analyzing Leak and Break Data for Making Main Replacement Decisions" (Organización y análisis de datos de fugas y roturas para tomar decisiones sobre el reemplazo de las tuberías principales). *Journal American Water Works Association*. Noviembre de 1982. Pág. 589.

- 111 O'Day.
- 112 Spickelmire, W. "Corrosion Control Considerations for Ductile Iron Pipe – A Consultant's Perspective" (Consideraciones para el control de la corrosión de las tuberías de hierro dúctil: la perspectiva de un consultor). *Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión*. 57.º curso corto anual internacional sobre corrosión subterránea en los Apalaches. (Mayo de 2012).
- 113 Schramuk, J., Rash, V. "Cathodic Protection for a New Ductile Iron Water Transmission Main" (Protección catódica para nuevas tuberías principales de hierro dúctil para transporte de agua). *Materials Performance* 44, no. 10 (2005): 20-24.
- 114 Baird, G. M. "Reforming Our Nation's Approach to the Infrastructure Crisis: How Competition, Oversight, and Innovation Can Lower Water and Sewer Rates in the U.S" (Reforma del enfoque de nuestra nación a la crisis de infraestructuras: de qué manera la competencia, la supervisión y la innovación pueden bajar las tasas de agua y alcantarillado en los EE. UU.). *National Taxpayers Union*. (Abril de 2013).
- 115 MacLeod, S. P. "Evaluating the Impact of Climate Change Mitigation Strategies on Water Distribution System Design and Optimization" (Evaluación del impacto de las estrategias de mitigación del cambio climático en el diseño y la optimización del sistema de distribución de agua). Apéndice A. *Universidad de Queens*. (2010).
- 116 Certificación SMaRT "Ductile Iron Pipe" (Tubería de hierro dúctil). <http://mts.sustainableproducts.com/DIP%20SMaRT%20Summary%20Sheet-1.pdf>.
- 117 Spirinckx, C.; Karolien, P.; Hannes, P. "Life Cycle Assessment of a PVC-U Versus Ductile Iron Pipe Systems for Water Distribution" (Análisis del ciclo de vida de sistemas de tuberías de PVC-U en comparación con las de hierro dúctil para la distribución de agua). VITO. (Diciembre de 2013).
- 118 Recio J.; Guerrero P.; Ageitos M.; Narvaez R. "Estimate of Energy Consumption and CO₂ Emission Associated with the Production, Use and Final Disposal of PVC, HDPE, PP, Ductile Iron and Concrete Pipes" (Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ asociados con la producción, el uso y la disposición final de tuberías de PVC, polietileno de alta densidad, polipropileno, hierro dúctil y concreto). *Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya* (Diciembre de 2005). <http://www.pvc4pipes.com/images/pdfs/Univ-Catalunya-pipes-energy-study-2005.pdf>.
- 119 Universidad de Sheffield. "Leaky Pipes can Allow Contaminants Into our Drinking Water" (Las tuberías con fugas pueden permitir que los contaminantes ingresen en nuestra agua potable). *ScienceDaily*. 7 de junio de 2015. www.sciencedaily.com/releases/2015/06/150607214248.htm. (Consultado el 18 de febrero de 2016).
- 120 Adam, David. "The Unheralded Polluter: Cement Industry Comes Clean on its Impact" (El contaminante imprevisto: la industria del cemento afecta de forma limpia). *The Guardian*. 12 de octubre de 2007. <http://www.theguardian.com/environment/2007/oct/12/climatechange>. (Consultado el 15 de abril de 2014).
- 121 Marceau, M. L.; Nisbet, M. A. "Environmental Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete" (Inventario del ciclo de vida ambiental del concreto de cemento Portland). *Portland Cement Association*. (Julio de 2007).
- 122 Chilana, L. "Carbon Footprint Analysis of a Large Diameter Water Transmission Pipeline Installation" (Análisis del impacto ecológico de la instalación de tuberías de diámetro grande para el transporte de agua). *Universidad de Texas en Arlington*. (Mayo de 2011).
- 123 Baitz, M. et al. "Life Cycle Assessment of PVC and of Principal Competing Materials" (Análisis del ciclo de vida del PVC y de los materiales competitivos principales). Por encargo de la Comisión Europea. (Julio de 2004).
- 124 Romer, A.; Ellison, D.; Bell, G.; Clark, B. "Failure of Prestressed Concrete Cylinder Pipe" (Fallos en las tuberías de cilindro de concreto pretensado). *Fundación de investigaciones de la AWWA y Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU.* (2008).
- 125 Hassinen, J., Lundbäck, M., Ifwarson, M., Gedde, U. W. "Deterioration of Polyethylene Pipes Exposed to Chlorinated Water" (Deterioro de las tuberías de polietileno expuestas a agua clorada). *Polymer Degradation and Stability*, 84(2): 261-267. (2004).
- 126 Carollo Engineers. "Evaluating the Compatibility of Chemical Disinfectants with Plastic Pipe Materials Used for Potable Water Distribution Technical Memorandum" (Evaluación del memorando técnico de la compatibilidad de los desinfectantes químicos con los materiales plásticos para tuberías usados para la distribución de agua potable). (Agosto de 2008). <http://hdpeoxidation.com/Carollo%20Study%20on%20HDPE-PVC%20Pipe%20-%20Disinfectant%20Oxidation%2008-08.pdf>. (Consultado el 15 de marzo de 2016).
- 127 "M55 PE Pipe – Design and Installation" (Tuberías de polietileno M55: diseño e instalación). *American Water Works Association*. Primera edición. 2006.
- 128 Rozental-Evesque, M.; Geoffray, D.; Jacq, P.; Rabaud, B. "The Polyethylene Sustainable Life-Cycle®, How To Improve Polyethylene Longevity?" (The Polyethylene Sustainable Life-Cycle®, ¿cómo mejorar la longevidad del polietileno?). *Suez-Environnement*.
- 129 Krishnaswamy, P., Shim, D. J. "A Review of Service Life Prediction Models for High Density Polyethylene Piping for Nuclear Safety-Related Applications" (Una revisión de los modelos de predicción de la vida útil para tuberías de polietileno de alta densidad para aplicaciones relacionadas con la seguridad nuclear). *Engineering Mechanics Corporation of Columbus*. <http://www.nrc.gov/docs/ML1025/ML102500337.pdf>.
- 130 Krishnaswamy, P. "Summary Report on Task 2 – Evaluate the Acceptability of Existing Applicable Standards" (Informe resumido de la tarea 2: evaluar la aceptabilidad de las normas de aplicación vigentes). *Engineering Mechanics Corporation of Columbus*. (Octubre de 2007). <http://www.nrc.gov/docs/ML1427/ML14273A451.pdf>.
- 131 Carollo Engineers. "Evaluating the Compatibility of Chemical Disinfectants with Plastic Pipe Materials Used for Potable Water Distribution Technical Memorandum" (Evaluación del memorando técnico de la compatibilidad de los desinfectantes químicos con los materiales plásticos para tuberías usados para la distribución de agua potable). (Agosto de 2008). <http://hdpeoxidation.com/Carollo%20Study%20on%20HDPE-PVC%20Pipe%20-%20Disinfectant%20Oxidation%2008-08.pdf>. (Consultado el 15 de marzo de 2016).

- 132 Rabaud, B., et al. "What is the Risk of Plastic Pipe Long-Term Degradation on Water Quality?" (¿Cuál es el riesgo de la degradación de las tuberías de plástico a largo plazo sobre la calidad del agua?). Tuberías Plásticas XVI. Barcelona, España, septiembre de 2012.
- 133 Martel, K., Klewicki, K. "State of the Science: Plastic Pipe" (Estado de la ciencia: tuberías de plástico). *Fundación de Investigación del Agua*. (2016).
- 134 Hassinen, J., Lundbäck, M., Ifwarson, M., Gedde, U. W. "Deterioration of Polyethylene Pipes Exposed to Chlorinated Water" (Deterioro de las tuberías de polietileno expuestas a agua clorada). *Polymer Degradation and Stability*, 84(2): 261-267. (2004).
- 135 Carollo Engineers. "Evaluating the Compatibility of Chemical Disinfectants with Plastic Pipe Materials Used for Potable Water Distribution Technical Memorandum" (Evaluación del memorando técnico de la compatibilidad de los desinfectantes químicos con los materiales plásticos para tuberías usados para la distribución de agua potable). (Agosto de 2008). <http://hdpeoxidation.com/Carollo%20Study%20on%20HDPE-PVC%20Pipe%20-%20Disinfectant%20Oxidation%208-08.pdf>. (Consultado el 15 de marzo de 2016).
- 136 Rabaud, B.; Rozental-Evesque, M.; "Interactions Between Polyethylene Water Pipes and Disinfectants Used in Drinking Water Treatments: How to Characterize the Ageing?" (Interacciones entre las tuberías de polietileno para agua y desinfectantes usados en el tratamiento de agua potable: ¿cómo describir el envejecimiento?). En actas de la Conferencia EUROCORR, Edimburgo, Escocia, 7 al 11 de septiembre. (2008).
- 137 Abolmaali, A.; Mothari, A. "Evaluation of HDPE Pipelines Structural Performance" (Evaluación del rendimiento estructural de las tuberías de polietileno de alta densidad). *Universidad de Texas en Arlington*. (2010).
- 138 Hammond, G.; Jones, C. "Inventory of Carbon and Energy" (Inventario de carbono y energía). Versión 2.0. *Universidad de Bath*. (Enero de 2011).
- 139 Franklin Associates. "Cradle-to-Resin Life Cycle Inventory Results for PP Resin" (Resultados del inventario del ciclo de vida de la cuna a la resina para resinas de polipropileno). (2010).
- 140 S & K Engineers. "City College of San Francisco Ocean Campus Infrastructure Final Project Proposal" (Propuesta del proyecto final de infraestructura de City College of San Francisco Ocean Campus). (Agosto de 2014).
- 141 Hammond, G.; Jones, C.; Lowrie, F.; Tse, P. "Inventory of Carbon & Energy: ICE" (Inventario de carbono y energía: ICE [por sus siglas en inglés]). Equipo de Investigación sobre Energía Sustentable, Departamento de Ingeniería Mecánica. *Universidad de Bath*. (2008).
- 142 Casey, T. "Removing Roots from a Sewer System" (Extracción de raíces de un sistema de alcantarillado). *Public Works*. (Septiembre de 1989): 134-135.
- 143 Hollands, B. "The Underground Infrastructure Crisis: Rebuilding Water and Sewer Systems without a Flood of Red Ink" (La crisis de la infraestructura subterránea: reconstruir sistemas de agua y alcantarillado sin un diluvio de números rojos). *National Taxpayers Union*. Nota breve 176. (2010). Pág. 4; "When Nature Attacks: Tree Roots, Earth, and Ground Water Damage" (Cuando ataca la naturaleza: daños por raíces de árboles, la tierra y el agua subterránea). *King5 News*. 20 de febrero de 2017. <http://www.king5.com/life/home-garden/home-appreciation/when-nature-attacks-tree-roots-earth-and-ground-water-damage/410208408>. (Consultado el 21 de febrero de 2017).
- 144 Anderson, R. "Municipal Procurement: Procurement Process Improvements Yield Cost-Effective Public Benefits" (Contratación municipal: mejoras en el proceso de compras producen beneficios públicos rentables). *U.S. Conference of Mayors*. Washington DC. (2013).
- 145 Administración de Información Energética de los EE. UU. "FAQ: How Much Electricity Does an American Home Use?" (Preguntas frecuentes: ¿Cuánta electricidad consume un hogar estadounidense?). <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=97&t=3>.
- 146 NSF International. "NSF 375 - Sustainability Assessment for Water Contact Products" (NSF 375: Evaluación de la sustentabilidad para productos en contacto con el agua). (Abril de 2016).
- 147 "SMaRT Consensus Sustainable Product Standards" (Normas de productos sustentables en consenso con SMaRT). The Institute for Market Transformation to Sustainability. http://mts.sustainableproducts.com/SMaRT_product_standard.html. (Consultado el 29 de abril de 2014).
- 148 Abolmaali, A.; Mothari, A. "Evaluation of HDPE Pipelines Structural Performance" (Evaluación del rendimiento estructural de las tuberías de polietileno de alta densidad). *Universidad de Texas en Arlington*. (2010).
- 149 Carollo Engineers. "Evaluating the Compatibility of Chemical Disinfectants with Plastic Pipe Materials Used for Potable Water Distribution Technical Memorandum" (Evaluación del memorando técnico de la compatibilidad de los desinfectantes químicos con los materiales plásticos para tuberías usados para la distribución de agua potable). (Agosto de 2008). <http://hdpeoxidation.com/Carollo%20Study%20on%20HDPE-PVC%20Pipe%20-%20Disinfectant%20Oxidation%208-08.pdf>. (Consultado el 15 de marzo de 2016).
- 150 Tuberías Iplex. "Environmental Product Declaration (EPD) PVC Pressure Pipes" (Declaración de producto ambiental [EPD, por sus siglas en inglés] para tuberías de presión de PVC). Cumplimiento de conformidad con la norma ISO 14025 y EN 15804 Versión 1.10. Fecha de aprobación 12 de junio de 2015.
- 151 Folkman, S. "Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study" (Tasas de roturas de tuberías principales de agua en los EE. UU. y Canadá: un estudio integral). *Laboratorio de Estructuras Subterráneas de la Universidad Estatal de Utah*. (2012).
- 152 Rajani B.; McDonald S. "Water Main Break Data for Different Pipe Materials for 1992 and 1993" (Datos de roturas en tuberías principales de agua para diferentes materiales de tuberías para 1992 y 1993). Informe n.º A-7019.1. *Consejo Nacional de Investigación de Canadá*. Ottawa. (1995).
- 153 Folkman, S. "Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study" (Tasas de roturas de tuberías principales de agua en los EE. UU. y Canadá: un estudio integral). *Laboratorio de Estructuras Subterráneas de la Universidad Estatal de Utah*. (2012). Pág. 18.
- 154 Paradkar, A. B. "An Evaluation of Failure Modes for Cast Iron and Ductile Iron Water Pipes" (Una evaluación de los modos de fallo para tuberías de agua de hierro fundido y hierro dúctil). *Universidad de Texas en Arlington*. (2012). Pág. 61.
- 155 Folkman, S. "Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study" (Tasas de roturas de tuberías principales de agua en los EE. UU. y Canadá: un estudio integral). *Laboratorio de Estructuras Subterráneas de la Universidad Estatal de Utah*. (2012).

- 156 Rajani, B.; Kleiner, Y.; Kryz, D. "Long-Term Performance of Ductile Iron Pipes" (Rendimiento a largo plazo de las tuberías de hierro dúctil). Fundación de Investigación del Agua. (2011). Pág. 103.
- 157 Baird, G. M. "Reforming Our Nation's Approach to the Infrastructure Crisis: How Competition, Oversight, and Innovation Can Lower Water and Sewer Rates in the U.S" (Reforma del enfoque de nuestra nación a la crisis de infraestructuras: de qué manera la competencia, la supervisión y la innovación pueden bajar las tasas de agua y alcantarillado en los EE. UU.). *National Taxpayers Union*. (Abril de 2013).
- 158 Burn, S.; Davis, P.; Schiller, T.; Tiganis, B.; Tjandraatmadja, G. "Long-Term Performance Prediction for PVC Pipes" (Predicción de rendimiento a largo plazo para tuberías de PVC). Fundación de Investigaciones de la AWWA. (2005).
- 159 Hulsmann, T.; Nowack, R. "70 Years of Experience with PVC Pipes" (70 años de experiencia con tuberías de PVC). Simposio Mundial de Tuberías. Milán, Italia. (2004).
- 160 Folkman, S. "PVC Pipe Longevity Report: Affordability & The 100+ Year Benchmark Standard. A Comprehensive Study on PVC Pipe Excavation's, Testing & Life Cycle Analysis" (Informe de longevidad de tuberías de PVC: asequibilidad y norma para estudio comparativo para más de 100 años. Un estudio exhaustivo sobre excavaciones, pruebas y análisis del ciclo de vida de las tuberías de PVC). Laboratorio de Estructuras Subterráneas de la Universidad Estatal de Utah. (2014).
- 161 Folkman, S. "Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study" (Tasas de roturas de tuberías principales de agua en los EE. UU. y Canadá: un estudio integral). Laboratorio de Estructuras Subterráneas de la Universidad Estatal de Utah. (2012).
- 162 Aubuchon, C.; Roberson, J. A. "Embodied Energy of Lost Water: Evaluating the Energy Efficiency of Infrastructure Investments" (Energía incorporada del agua perdida: evaluación de la eficiencia energética de las inversiones en infraestructura). *Actas de la Federación Ambiental del Agua* 2013, no. 3 (2013): 573-584. http://www.analysisgroup.com/uploadedfiles/content/insights/publishing/2013_aubuchon_economicsofwater.pdf. (Consultado el 10 de septiembre de 2016).
- 163 Rajani B.; McDonald S. "Water Main Break Data for Different Pipe Materials for 1992 and 1993" (Datos de roturas en tuberías principales de agua para diferentes materiales de tuberías para 1992 y 1993). Informe n.º A-7019.1. Consejo Nacional de Investigación de Canadá. Ottawa. (1995).
- 164 Folkman, S. "Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study" (Tasas de roturas de tuberías principales de agua en los EE. UU. y Canadá: un estudio integral). Laboratorio de Estructuras Subterráneas de la Universidad Estatal de Utah. (2012).
- 165 Paradkar, A. B. "An Evaluation of Failure Modes for Cast Iron and Ductile Iron Water Pipes" (Una evaluación de los modos de fallo para tuberías de agua de hierro fundido y hierro dúctil). Universidad de Texas en Arlington. (2012). Pág. 62.
- 166 Folkman, S. "Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study" (Tasas de roturas de tuberías principales de agua en los EE. UU. y Canadá: un estudio integral). Laboratorio de Estructuras Subterráneas de la Universidad Estatal de Utah. (2012).
- 167 Rajani, B.; Kleiner, Y.; Kryz, D. "Long-Term Performance of Ductile Iron Pipes" (Rendimiento a largo plazo de las tuberías de hierro dúctil). Fundación de Investigación del Agua. (2011). Pág. 103.
- 168 Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. "Water & Energy Efficiency" (Eficiencia energética y del agua). <https://www.epa.gov/sustainable-water-infrastructure/water-and-energy-efficiency>. Última actualización el 14 de septiembre de 2012. (Consultado el 29 de abril de 2015).
- 169 AWWA C906-15 Tuberías de presión de polietileno (PE) y accesorios, 4 a 65 pulgadas (100 mm a 1650 mm), para abastecimiento de agua.
- 170 Carollo Engineers. "Evaluating the Compatibility of Chemical Disinfectants with Plastic Pipe Materials Used for Potable Water Distribution Technical Memorandum" (Evaluación del memorando técnico de la compatibilidad de los desinfectantes químicos con los materiales plásticos para tuberías usados para la distribución de agua potable). (Agosto de 2008). <http://hdpeoxidation.com/Carollo%20Study%20on%20HDPE-PVC%20Pipe%20-%20Disinfectant%20Oxidation%208-08.pdf>. (Consultado el 15 de marzo de 2016).
- 171 Paradkar, A. B. "An Evaluation of Failure Modes for Cast Iron and Ductile Iron Water Pipes" (Una evaluación de los modos de fallo para tuberías de agua de hierro fundido y hierro dúctil). Universidad de Texas en Arlington. (2012). Pág. 57.
- 172 Paradkar. Pág. 57.
- 173 Paradkar. Pág. 14-15.
- 174 "Aging Infrastructure and Corrosion: Background Information on Distribution System Areas of Concern" (Envejecimiento de la infraestructura y la corrosión: antecedentes sobre las áreas de preocupación del sistema de distribución). AWWA. http://www.safedrinkingwater.com/community/usepa_111402/buried_infrastructure.pdf. (Consultado el 10 de febrero de 2012).
- 175 Paradkar, A. B. "An Evaluation of Failure Modes for Cast Iron and Ductile Iron Water Pipes" (Una evaluación de los modos de fallo para tuberías de agua de hierro fundido y hierro dúctil). Universidad de Texas en Arlington. (2012). Pág. 57.
- 176 Paradkar. Pág. 57.
- 177 Paradkar. Pág. 14.
- 178 Paradkar. Pág. 57-58.
- 179 Paradkar. Pág. 58.
- 180 Paradkar. Pág. 58-59.
- 181 Paradkar. Pág. 58.
- 182 Paradkar. Pág. 58.
- 183 Folkman, S. "Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study" (Tasas de roturas de tuberías principales de agua en los EE. UU. y Canadá: un estudio integral). Laboratorio de Estructuras Subterráneas de la Universidad Estatal de Utah. (2012).

- 184 "10% of Japan's Water Pipes Past Service Life" (El 10 % de las tuberías de agua de Japón supera su vida útil). The Mainichi. <http://mainichi.jp/english/articles/20151231/p2a/00m/0na/006000c>.
- 185 Koziol, John. "Ground Broken on \$6m Water, Sewer Project in Colebrook" (Se inició el movimiento de tierras en un proyecto de agua y alcantarillado de USD 6 millones en Colebrook). Union Leader. 24 de julio de 2016. <http://www.unionleader.com/article/20160725/NEWS0606/160729821>.
- 186 Grigg, N. S. "Secondary Impacts of Corrosion Control on Distribution System and Treatment Plant Equipment" (Efectos secundarios del control de la corrosión en sistemas de distribución y equipos de plantas de tratamiento). *Fundación de Investigación del Agua*. (2010).
- 187 "Fluoridation of Drinking Water and Corrosion of Pipes in Distribution Systems Fact Sheet" (Hoja informativa de la fluoración del agua potable y la corrosión de tuberías en los sistemas de distribución). Centro para el Control y la Prevención de Enfermedades. <http://www.cdc.gov/fluoridation/factsheets/engineering/corrosion.htm>. (Consultado el 10 de julio de 2016).
- 188 Meland, I. S. "Durability of Mortar Linings in Ductile Iron Pipes" (Durabilidad de revestimientos de mortero en tuberías de hierro dúctil). *Consejo Nacional de Investigación de Canadá*. (1999).
- 189 Neville, A. "Effect of Cement Paste on Drinking Water" (Efecto de la pasta de cemento sobre el agua potable). *Materials and Structures (Materiales y Estructuras)* 34, no. 6 (2001): 367-372.
- 190 Gonzales, S.; Lopez-Roldan, R.; Cortina, J. L. "Presence of Metals in Drinking Water Distribution Networks Due to Pipe Material Leaching: A Review" (Presencia de metales en las redes de distribución de agua potable debido a la lixiviación de material de las tuberías: revisión). *Toxicological & Environmental Chemistry* 95, no. 6 (2013): 870-889.
- 191 Dąbrowski, W.; Buchta, R.; Mackie, R. I. "Impact of Water Blending on Calcium Carbonate Equilibrium in Water Distribution Systems" (Efectos de la mezcla de agua en el equilibrio del carbonato de calcio en los sistemas de distribución de agua). *Journal of Environmental Engineering* 130, no. 9 (2004): 1059-1062.
- 192 Dell'Orso, M.; Teresa, M.; Antonio, E. P.; Luigi, P. "Evaluation of the Leachability of Heavy Metals from Cement-Based Materials" (Evaluación de la lixiviación de metales pesados de los materiales a base de cemento). *Journal of Hazardous Materials* 227 (2012): 1-8.
- 193 Leroy, P.; Schock, M.; Wagner, I.; Holtschulte, H. "Internal Corrosion of Water Distribution Systems" (Corrosión interna de los sistemas de distribución de agua). AWWARF y TZW. (1996).
- 194 Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. "Permeation and Leaching" (Infiltración y lixiviación). AWWA. (2002). Pág. 11.
- 195 Douglas, B.D.; Merrill, D.T. "Control of Water Quality Deterioration Caused By Corrosion of Cement-Mortar Pipe Linings" (Control del deterioro de la calidad del agua causado por la corrosión de revestimientos de tuberías de mortero de cemento). *Fundación de Investigación del Agua*. (1991).
- 196 Meland, I. S. "Durability of Mortar Linings in Ductile Iron Pipes" (Durabilidad de revestimientos de mortero en tuberías de hierro dúctil). *Consejo Nacional de Investigación de Canadá*. (1999).
- 197 ACIPCO. "Linings" (Revestimientos). 12 junio de 2002.
- 198 Guo, Q.; Toomuluri, P. J. y Eckert Jr, J. O. "Leachability of Regulated Metals from Cement-Mortar Linings" (Lixiviación de metales regulados a partir de revestimientos de mortero de cemento). *American Water Works Association. Journal* 90, no. 3 (1998): 62.
- 199 Berend, K.; Trouwborst, T. "Cement-Mortar Pipes as a Source of Aluminum" (Tuberías de mortero de cemento como fuente de aluminio). *Journal American Water Works Association* 91, no. 7 (1999): 91-100.
- 200 Berend, Trouwborst.
- 201 Zielina, M.; Dabrowski, W.; Radziszewska-Zielina, E. "Cement Mortar Lining as a Potential Source of Water Contamination" (Revestimiento de mortero de cemento como posible fuente de contaminación del agua). *Academia Mundial de Ciencia, Ingeniería y Tecnología, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering* 8, no. 10 (2014): 723-726. <http://waset.org/publications/9999592/cement-mortar-lining-as-a-potential-source-of-water-contamination>. (Consultado el 15 de marzo de 2015).
- 202 Berend, K.; Trouwborst, T. "Cement-Mortar Pipes as a Source of Aluminum" (Tuberías de mortero de cemento como fuente de aluminio). *Journal American Water Works Association* 91, no. 7 (1999): 91-100.
- 203 Milman, O.; Glenza, J. "At Least 33 US Cities Used Water Testing 'Cheats' Over Lead Concerns" (Al menos 33 ciudades de los EE. UU. usaron pruebas tramposas en el agua debido a la preocupación por el plomo). <http://www.theguardian.com/environment/2016/jun/02/lead-water-testing-cheats-chicago-boston-philadelphia>. (Consultado el 2 de junio de 2016).
- 204 Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. "Permeation and Leaching" (Infiltración y lixiviación). AWWA. (2002). Pág. 12.
- 205 Henderson, Derrion. "Water Concerns Led to DNR Investigation in Leadwood, MO" (La preocupación por el agua llevó a la investigación del Departamento de Recursos Naturales en Leadwood, MO). KFVS 12. 7 de febrero de 2017. <http://www.kfvs12.com/story/34450337/water-concerns-led-to-dnr-investigation-in-leadwood-mo>. (Consultado el 17 de febrero de 2017).
- 206 Busch, E. B. "The Clinical Effects of Manganese (Mn)" (Los efectos clínicos del manganeso (Mn)). *Carta de Townsend para médicos y pacientes*. <http://www.tldp.com/issue/180/Clinical%20Effects%20of%20Mn.html>.
- 207 Departamento de Salud Pública. "Manganese in Drinking Water" (El manganeso en el agua potable). http://www.ct.gov/dph/lib/dph/drinking_water/pdf/manganese.pdf
- 208 "Iron's Dangers" (Los peligros del hierro). Ray Peat. <http://raypeat.com/articles/articles/iron-dangers.shtml>. (Consultado el 17 de febrero de 2017).

- 209 Jerome, Sara. "Are the Dangers of Iron in Water Being Ignored?" (¿Están ignorándose los peligros del hierro en el agua?). Water Online. 11 de mayo de 2016. <https://www.wateronline.com/doc/are-the-dangers-of-iron-in-water-being-ignored-0001>. (Consultado el 17 de febrero de 2017).
- 210 Panko, Ben. "Scientists Now Know Exactly How Lead Got Into Flint's Water" (Los científicos ahora saben exactamente cómo llegó el plomo al agua de Flint). Smithsonian. 3 de febrero de 2017. <http://www.smithsonianmag.com/science-nature/chemical-study-ground-zero-house-flint-water-crisis-180962030/>.
- 211 Moore, Katie. "Presence of Iron in Local Water Supplies Could Cause Health Problems" (La presencia de hierro en el suministro de agua local puede causar problemas de salud). <http://www.wvltv.com/news/local/investigations/katie-moore/presence-of-iron-in-local-water-supplies-could-cause-health-problems/170571490>. (Consultado el 10 de septiembre de 2016).
- 212 Folkman, S. "Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study" (Tasas de roturas de tuberías principales de agua en los EE. UU. y Canadá: un estudio integral). Laboratorio de Estructuras Subterráneas de la Universidad Estatal de Utah. (2012).
- 213 Baird, G. M. "Reforming Our Nation's Approach to the Infrastructure Crisis: How Competition, Oversight, and Innovation Can Lower Water and Sewer Rates in the U.S" (Reforma del enfoque de nuestra nación a la crisis de infraestructuras: de qué manera la competencia, la supervisión y la innovación pueden bajar las tasas de agua y alcantarillado en los EE. UU.). National Taxpayers Union. (Abril de 2013).
- 214 Folkman, S. "Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study" (Tasas de roturas de tuberías principales de agua en los EE. UU. y Canadá: un estudio integral). Laboratorio de Estructuras Subterráneas de la Universidad Estatal de Utah. (2012).
- 215 Rajani, B.; Kleiner, Y.; Kryz, D. "Long-Term Performance of Ductile Iron Pipes" (Rendimiento a largo plazo de las tuberías de hierro dúctil). Fundación de Investigación del Agua. (2011). Pág. 103.
- 216 Masters, S.; Edwards, M. "Increased Lead in Water Associated with Iron Corrosion" (Aumento del plomo en el agua asociado con la corrosión del hierro). Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Instituto Politécnico y Universidad Estatal de Virginia. (2015). <http://online.liebertpub.com/doi/abs/10.1089/ees.2014.0400>.
- 217 Friedman, M. J.; Hill, A. S.; Reiber, S. H.; Valentine, R. L.; Larsen, G.; Young, A.; Korshin, G. V.; Peng, C. Y. "Assessment of Inorganics Accumulation in Drinking Water System Scales and Sediments" (Evaluación de la acumulación de compuestos inorgánicos en el sarro y los sedimentos del sistema de agua potable). Fundación de Investigación del Agua. (2010).
- 218 Jerome, Sarah. "Are the Dangers of Iron in Water Being Ignored?" (¿Están ignorándose los peligros del hierro en el agua?). Water Online. http://www.wateronline.com/doc/are-the-dangers-of-iron-in-water-being-ignored-0001?user=834389CB-56AB-4701-B514-394828D32B3B&vm_tId=1902307&utm_source=et_10759433&utm_medium=email&utm_campaign=WOL_05-17-2016&utm_term=834389CB-56AB-4701-B514-394828D32B3B&u. (Consultado el 1° de julio de 2016).
- 219 Greene, Jay. "McLaren Flint Blasts Michigan Health Department Over Legionnaires' Outbreak" (McLaren Flint critica al Departamento de Salud de Michigan por el brote de la enfermedad del legionario). Crain's Detroit Business. 16 de febrero de 2017. <http://www.crainsdetroit.com/article/20170216/NEWS/170219873/mclaren-flint-blasts-michigan-health-department-over-legionnaires>. (Consultado el 23 de febrero de 2017).
- 220 Cochran, T. "Report Prepared for the Conference of Mayors Winter Leadership Meeting Regarding the Flint Water Crisis" (Informe preparado por la reunión de liderazgo de invierno de Conference of Mayors con respecto a la crisis del agua en Flint). U.S. Conference of Mayors. 18 de febrero de 2016.
- 221 Cochran.
- 222 Ganim, Sara. "Flint Water Crisis Likely the Cause of Deadly Legionnaires Outbreak" (La crisis del agua en Flint puede ser la causa del brote mortal de enfermedad del legionario). CNN. 30 de marzo de 2017. <http://www.cnn.com/2017/03/30/health/legionnaires-disease-flint-water-crisis-study/>. (Consultado el 31 de marzo de 2017).
- 223 Roy, Siddhartha. "Why is it Possible That Flint River Water Cannot be Treated to Meet Federal Standards?" (¿Por qué no se puede tratar el agua del río Flint para cumplir con los estándares federales?). Estudio del agua en Flint. <http://flintwaterstudy.org/tag/drinking-water/> (Consultado el 2 de junio de 2016).
- 224 Roy.
- 225 Roy, Siddhartha. "Why is it Possible That Flint River Water Cannot be Treated to Meet Federal Standards?" (¿Por qué no se puede tratar el agua del río Flint para cumplir con los estándares federales?). Estudio del agua en Flint. <http://flintwaterstudy.org/tag/drinking-water/> (Consultado el 2 de junio de 2016).
- 226 El Din, A. M. Shams. "The Problem of "Red Waters": A New Approach to its Solution". (El problema del "agua roja": un nuevo enfoque para su solución). Desalination 60, no. 1 (1986): 75-88.
- 227 Reynaud, A. "Corrosion of Cast Irons" (Corrosión del hierro fundido) en Shreir's Corrosion, T. J. A. Richardson, Ed., vol. 3, capítulo 2, pág. 1737-1788, 2010.
- 228 Volk, C.; Dundore, E.; Schiermann, J.; LeChevallier, M. "Practical Evaluation of Iron Corrosion Control in a Drinking Water Distribution System" (Evaluación práctica del control de la corrosión del hierro en un sistema de distribución de agua potable). Water Research 34, no. 6 (2000): 1967-1974.
- 229 Vahidi, E.; Jin, E.; Das, M.; Singh, M.; Zhao, F. "Comparative Life Cycle Analysis of Materials in Wastewater Piping Systems" (Análisis comparativo del ciclo de vida de los materiales en los sistemas de tuberías de aguas residuales). Procedia Engineering 118 (2015): 1177-1188.



Sustainable**Solutions**
CORPORATION



Sustainable**Solutions**
CORPORATION

155 Railroad Plaza, Suite 203
Royersford, PA 19468 EE. UU.

T : 610 569 1047

F : 610 569 1040

www.SustainableSolutionsCorporation.com

