Contenido

6. Resultados de los indicadores y opciones en Ciudad Verde 3
6.1. Resultados de evaluación de indicadores y análisis año base (2018) 3
6.1.1. Ecología urbana 3
6.1.2. Manejo integrado del agua 13
6.1.3. Suministro y uso de energía 31
6.1.4. Gestión de residuos 41
6.1.5. Movilidad sostenible 51
6.1.6. Edificaciones e infraestructura urbana 64
6.2. Línea base de emisiones GEI en Ciudad Verde (2018 - 2030) 73
6.2.1. Ecología urbana 75
6.2.2. Manejo integrado del agua 75
6.2.3. Suministro y uso de energía 82
6.2.4. Gestión de residuos 83
6.2.5. Movilidad sostenible 92
6.2.6. Edificaciones e infraestructura urbana 95
6.2.7. Análisis integrado de la línea base 102
6.3. Medidas de mitigación y adaptación 105
6.3.1. Ecología urbana 105
6.3.2. Manejo integrado del agua 110
6.3.3. Suministro y uso de la energía 139
6.3.4. Gestión de residuos 149
6.3.5. Movilidad sostenible 166
6.3.6. Edificaciones e infraestructura 180
6.3.7. Resultados de la herramienta de integración para las opciones de mitigación 227
Referencias 236
Anexo 5. Marcos de referencia para la comparación de indicadores del sector Gestión de Residuos 248
Anexo 6. Cálculo de línea base de emisiones de GEI del sector Gestión de Residuos 251
Anexo 7. Metodología de evaluación de consumo y emisiones en operación sector residencial ... 257
Anexo 8. Metodología de evaluación de consumo y emisiones en operación sector no residencial 261
Anexo 9. Metodología y fuentes de información para cálculo del carbono incorporado 263

Anexo 10. Metodología para la evaluación de medidas de mitigación en Ciudad Verde Sector Manejo Integrado del Agua 267

Anexo 11. Supuestos de modelación medidas de mejora Sector Gestión de Residuos 282

Anexo 12. Metodología de ejecución de simulaciones termo energéticas de edificios de vivienda 290

6. Resultados de los indicadores y opciones en Ciudad Verde

De acuerdo con los datos recolectados en la encuesta y grupos focales en Cuidad Verde, información secundaria y el planteamiento metodológico para la evaluación de indicadores y la contabilidad de emisiones mostrado en capítulos anteriores, se realiza el análisis del macroproyecto de vivienda Ciudad Verde. En las secciones a continuación, se presentan la estimación de los indicadores en el año base por cada sector y su evaluación comprensiva difusa, asignando etiquetas lingüísticas de acuerdo con su desempeño. Igualmente, se muestra la evaluación de los indicadores agrupados por las etapas de avance de la ciudad que fueron definidas por cada sector (Sección 4.4). Por otro lado, se presenta la estimación y análisis de la línea base de emisiones de GEI por cada sector y las emisiones agrupadas tanto en la clasificación de sectores definidas para este proyecto como en la clasificación establecida por el IPCC para inventario nacionales de GEI (clasificación alternativa).

Posteriormente, se muestran las medidas propuestas por cada sector y sus resultados en mitigación, adaptación, otros impactos y su evaluación de costo-eficiencia. Se presentan también paquetes de medidas definidos por los algunos sectores. Asimismo, se muestra la integración (mediante la herramienta expuesta en el Capítulo 3) de las medidas y paquetes sectoriales en seis escenarios y sus resultados en términos de emisión de GEI, adaptación al cambio climático, costos y beneficios, costo-efectividad, otros impactos y factibilidad e incertidumbre de las medidas contempladas en cada escenario. En los anexos se presentan detalles metodológicos sobre el cálculo de la línea base y supuestos de modelación de medidas de mejora para algunos sectores, así como los valores de referencia empleados para la comparación de indicadores en el sector residuos.

6.1. Resultados de evaluación de indicadores y análisis año base (2018)

Esta sección del documento presenta la consolidación de la información respecto al proceso de evaluación de indicadores de Ciudad Verde para el año base, año 2018. Inicialmente, cada uno de los sectores realiza la estimación y análisis de los resultados de los indicadores seleccionados para la evaluación del macroproyecto en estudio. Seguidamente, con la información obtenida de los indicadores, se presentan los resultados de la evaluación sectorial basada en la definición de etapas o fases que dan cuenta del estado de avance del macroproyecto (Ciudad Verde) considerando diferentes aspectos de la sostenibilidad. El Método de Evaluación Comprensiva Difusa (FCEM), descrito en detalle en el capítulo 2, fue utilizado para tal fin. Este método permite realizar una evaluación objetiva y comprensiva involucrando términos lingüísticos en su descripción, lo que facilita su interpretación para la toma de decisiones.

6.1.1. Ecología urbana

Para el análisis de Ciudad Verde se realizaron mediciones a nivel del proyecto. Esto no quiere decir que se estén ignorando los distintos niveles de interconexión, ni las relaciones de escala y temporales, es sencillamente el primer paso para establecer una línea base de análisis que no pretende ignorar el conjunto por elemento. En la Tabla 1 se presenta el resumen de los valores de indicadores evaluados para el componente de Ecología Urbana. A continuación, se explica el marco de referencia existente para la ponderación mismos.

Tabla 1. Valor indicadores Ecología Urbana para Ciudad Verde. Fuente: Elaboración propia.

Indicador	Valor Ciudad Verde 2018		Marco de referencia	
Área verde pública total por habitante	5.99 m^2/ habitante		10-15 m^2/habitante	
Área verde protegida (EEP)	9%		NA	
Área espacios públicos infraestructura verde por habitante	3.77 m^2/ habitante		4-10 m^2/ habitante	
Área Espacios verdes privados	278,400 m^2		NA	
Accesibilidad Social	Parques zonales	100%	Parques zonales	100% <= 300 m
	Parques Metropolitanos	100%	Parques Metropolitanos	100% <=2 km
Conectividad (ecológica)	Débil		Robusta	
Naturalidad	45.84%		80%	
Captura de CO_2	343.73 tCO_2/año		NA	
Islas de calor	9.1ºC		<=+3ºC	

Los espacios verdes de Ciudad Verde fueron cuantificados y categorizados con base en la Figura 1.

Figura 1. Cobertura y uso del suelo Ciudad Verde. Fuente: Elaboración propia con base en el plano de usos de Amarilo

En la Tabla 2 se relacionan las áreas de cada uno de estos espacios, los tipos y categorías que se encontraron en el Plan Zonal y en la Figura 2 se muestra su distribución espacial.

Tabla 2. Área por tipo de espacio verde 2022. Fuente: Elaboración propia

CIUDAD VERDE					
Area total del proyecto		3,259,967.23	Habitantes 133,573.00	Densidad	3,55 hab/viv
Tipología	Áreas Verdes	M2	M2/HAB	% Areas Verdes	% Tipología
Áreas Urbanas Protegidas	ZMPA Río Soacha	72,031.78	0.54	0.02	0.02
	Subtotal Areas Protegidas	**72,031.78**	**0.54**	**0.02**	**0.02**
Parques Metropolitanos	Parque de la Niebla	145,761.17	1.09	0.04	0.15
Parques Urbanos	Alamedas	32,418.23	0.24	0.01	
	Parques zonales	325,611.78	2.44	0.10	
	Subtotal Parques	**503,791.18**	**3.77**	**0.15**	**0.15**
Sistema Vial	Separadores Viales	66,602.80	0.50	0.02	0.07
	Controles Ambientales	157,868.56	1.18	0.05	
	Subtotal Sistema Vial	224,471.36	1.68	0.07	0.07
	Total Áreas Públicas	***800,294.32***	***5.99***	***0.25***	***0.25***
Jardines y Patios	Áreas Verdes Privadas	278,400.00	2.08	0.09	0.09
	Total Jardines y Patios	278,400.00	2.08	0.09	0.09

Figura 2. Espacios Verdes "Ciudad verde" 2022. Fuente: Elaboración propia con base en el plano de usos de Amarilo

A la fecha hay cerca de 435,814.07 metros cuadrados correspondientes a lotes sin desarrollar, según Resolución de aprobación del proyecto los mismos serán desarrollados en los próximos años para nuevas unidades de vivienda y usos complementarios. Por lo anterior, la ponderación de indicadores en el caso de Ciudad Verde la línea base corresponde a la totalidad de áreas construidas y a la población actual. A continuación, se presentan en detalle los indicadores utilizados para la evaluación de este caso de estudio en particular.

- **Disponibilidad de área verde pública por habitante**

Para realizar una primera aproximación a la medición de este indicador, se tomó la totalidad del área verde pública identificada dentro de las cerca de 326 hectáreas del proyecto, y con base en un estimado de 133,573 habitantes para el año base (2018), se evaluó este indicador.

$$Área\ verde\ por\ habitante\ (actual) = \frac{800{,}294.32 m^2\ de\ área\ verde}{133{,}573\ \ habitantes} = 5.99 \frac{m^2\ de\ área\ verde}{habitante}$$

La estimación de este indicador abarca el total de las áreas verdes públicas, con lo cual este indicador resulta mayor que el indicador de 4.76 m^2 de área verde por habitante reportado para el municipio de Soacha, como parte del Índice de Calidad Ambiental Urbana (ICAU) [1], pero no alcanza el mínimo recomendado por la OMS. Más aún, teniendo en cuenta que, para el escenario del año base estimado, no se encuentran construidas y habitadas la totalidad de las unidades de vivienda proyectadas, es decir a lo largo del tiempo, este indicador va a tener una tendencia a disminuir.

- **Área verde protegida (EEP)**

No todos los proyectos de desarrollo urbano tienen o deben tener áreas protegidas en su interior, por lo que no hay un marco de referencia para este indicador. En el caso de Ciudad Verde, se encuentra que en su borde inferior tiene una afectación mínima por la ZMPA del río Soacha que es equivalente al 9% de las áreas verdes del proyecto.

$$Área\ verde\ protegida\ = \frac{72{,}031.78\ m^2\ de\ área\ verde\ protegida}{800{,}294.32\ m^2\ de\ área\ verde\ total} = 9\%$$

Dado que no se encontró en la literatura un valor de referencia que relacione la cantidad de área verde protegida con el número de habitantes, la disponibilidad de áreas verdes protegida se pondera principalmente en relación con su función de conectividad ecológica y medidas de mitigación.

- **Área espacios públicos infraestructura verde por habitante**

Si se toma sólo el área verde efectiva, es decir parques y alamedas, se obtiene un valor de 3.77 m^2 por habitante.

$$Área\ espacios\ públicos\ infraestructura\ verde/hab\ = \frac{503{,}791.18 m^2}{133{,}573\ habitantes} = 3.77 \frac{m^2}{habitante}$$

Este valor se encuentra por debajo del valor de referencia de 4 a 10 metros cuadrados por habitante, más teniendo en cuenta el crecimiento futuro de la población.

- **Área espacios verdes privados**

Los conjuntos en su interior deben dejar cesiones de espacio público que oscilan entre el 12% y el 15% del área neta del conjunto. A partir de la visita y de las aéreo fotografías se evidenció que gran parte de las cesiones de espacio público son ocupadas por estacionamientos en superficie generalmente adoquinados. Utilizando la ortofoto y software de análisis geográfico se pudo determinar que al interior de los conjuntos hay 278,400 m^2 aproximadamente de áreas verdes. De acuerdo con los datos presentados, es evidente que el porcentaje de área verde que corresponde a parques y áreas verdes privadas dentro de conjuntos es relevante. Lo anterior, resalta la importancia de las funciones sociales y ecológicas que cumplen los espacios verdes aun siendo privados y no contabilizados en la disponibilidad general.

- **Accesibilidad social**

Para la medición de este indicador, se incluyeron los espacios verdes públicos que corresponden principalmente a parques. Respecto a éste, no existe un estándar globalmente aceptado en términos de tiempo o de distancia a diferentes espacios verdes, sin embargo, ésta se relaciona con distancias a las cuales sea posible acceder caminando desde los hogares especialmente por niños. Por esto, se realizó un ejercicio de iteración en el cual se encontró que el 97.6% del área total se encuentra a una distancia menor o igual a 200 metros de algún tipo de espacio verde.

Con objeto de establecer la ubicación relativa de las áreas verdes en relación con los habitantes del proyecto, se realizó una estimación de la accesibilidad a espacios verdes por medio de “buffers” de 300 de los parques lineales, locales, zonales y metropolitanos como se muestra en la Figura 3. Indicador de accesibilidad "Ciudad verde".. Se encontró que el 100% de las unidades de vivienda tienen acceso a estos espacios a distancias menores o iguales a 300 metros. En cuanto a la accesibilidad a espacios verdes de escala metropolitana, es decir para este caso, el “Parque de la Niebla”, se encontró que la totalidad de las unidades de vivienda de Ciudad Verde se encuentran a distancias menores de 2 km, indicador que corresponde al deseable propuesto en el “UK National Ecosystem Assessment” [2].

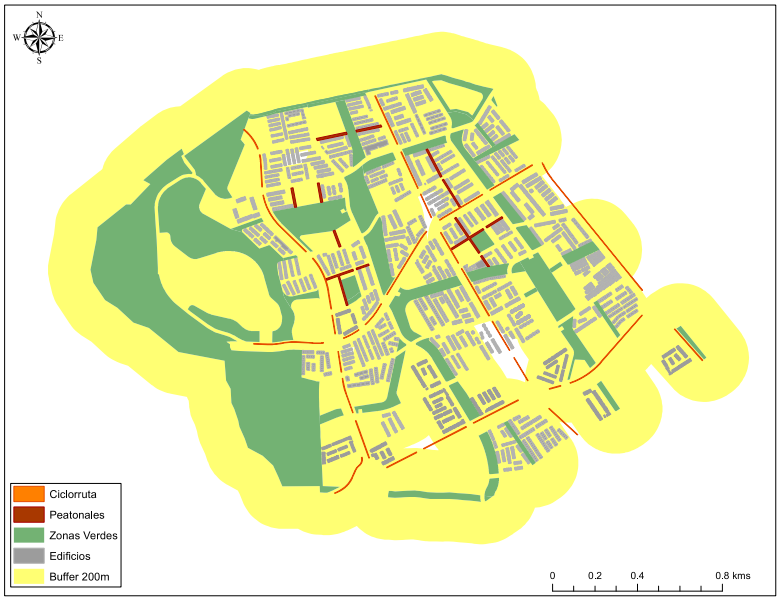


Figura 3. Indicador de accesibilidad "Ciudad verde". Fuente: Elaboración propia con base en el plano de usos de Amarilo.

- **Conectividad ecológica**

La conectividad ecológica se refiere a la capacidad que tienen los espacios verdes en general, pero en particular los correspondientes a la estructura ecológica principal de constituir sistemas ecológicos continuos y funcionales. En la medida en que en el perímetro de Ciudad Verde no se ubican áreas significativas de la estructura ecológica principal, no se está generando ningún tipo de conectividad, razón por la cual este indicador aparece como “malo” en el caso de Ciudad Verde.

- **Índice de naturalidad**

Un fenómeno reciente en Ciudad Verde es el endurecimiento y construcción, por ahora mínimos, de algunas zonas verdes para suplir necesidades expresadas por los habitantes tales como espacios para comercio al por menor. Esto puede convertirse en una tendencia que progresivamente disminuya la naturalidad de los espacios verdes del proyecto. Adicionalmente, sin un adecuado diseño, implementación y cuidado de las áreas verdes, estas se pueden convertir en espacios que, como lo han manifestado los habitantes, transmitan inseguridad. Esto puede llevar a que se abandonen y se exija un endurecimiento o construcción de estas áreas dada la percepción de inseguridad. Asimismo, las áreas verdes sin cuidado también pueden ser propensas a invasiones que endurezcan las superficies y disminuyan la naturalidad. En la Figura 4 se presentan la estimación del índice de naturalidad de acuerdo con la metodología presentada en la ficha anexada de nombre “Índice de Naturalidad”.

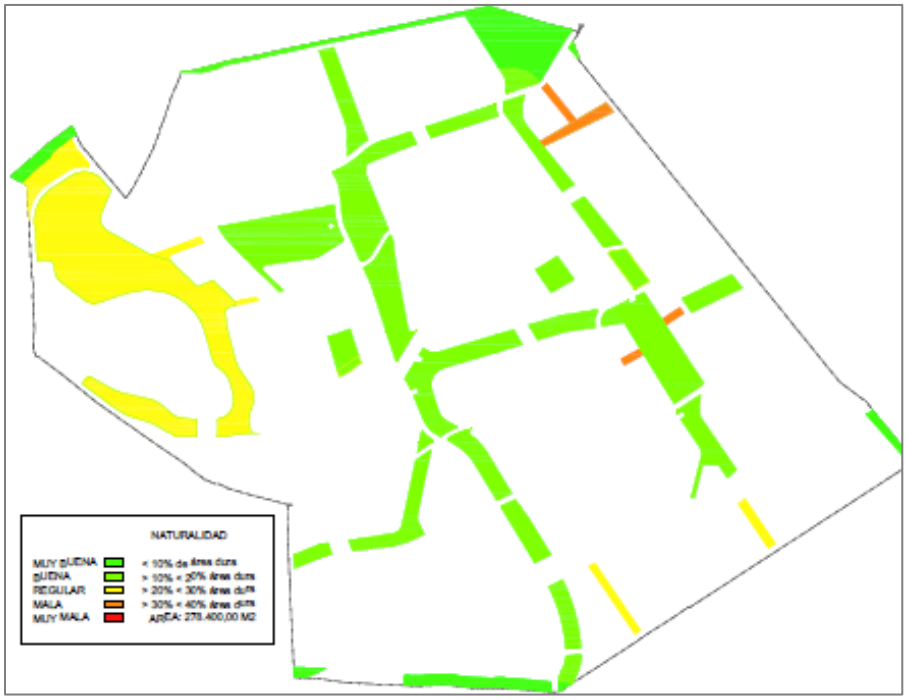


Figura 4. Áreas verdes con distintos tipos de endurecimiento. Fuente: Elaboración propia con base en el plano de usos de Amarilo.

Dado que las áreas verdes del proyecto no han sido terminadas en su totalidad y hay espacios, como el parque de la niebla, del que se desconoce incluso su diseño, sólo se hace un análisis a nivel de generalidad de las áreas verdes. Para esto se usan aéreo fotografías y en casos donde no se ha terminado la implementación, se usaron proxys de las áreas verdes ya terminadas y de otras áreas equivalentes en Bogotá como se muestra en la Figura 4.

$$Naturalidad = \frac{672{,}247.23m^2 \ de\ área\ verde\ \text{sin}\ endurecer}{800{,}294.32m^2 \ de\ área\ verde} = 84\%\ de\ área\ verde\ \text{sin}\ endurecer$$

$$Naturalidad = \frac{61.500m^2 \ de\ área\ verde\ con\ árboles}{800{,}294.32m^2 \ de\ área\ verde} = 7.68\%\ de\ área\ verde\ con\ árboles$$

$$Naturalidad = \frac{84\% + 7.68\%}{2} = 45.84\%\ de\ naturalidad$$

Se obtiene un valor de 45.84% de naturalidad que está por debajo del valor recomendado del 80%.

- **Cobertura forestal y Captura de CO_2**

La estimación de los cambios en la existencia de C en biomasa aérea para la cobertura forestal se llevó a cabo con base en las directrices y factores recomendados por el IPCC [3][4][5] como se detalla en el capítulo de línea base y en la ficha anexa. En tal sentido, el cambio en la existencia de CO_2 para cobertura forestal es de 10.28 tCO_2 ha de cobertura de $copas^{-1}año^{-1}$. Es decir que las 6.15 hectáreas identificadas por medio de imágenes satelitales que cuentan con cobertura arbórea para 2018 en Ciudad Verde, capturan anualmente alrededor de 63.2 tCO_2. En cuanto a la biomasa aérea en cobertura de pastos se tiene en cuenta un factor de $52.5gCm2^{-1}año^{-1}$, y 145.6 ha de pastos con lo cual la captura de CO_2 se estima anualmente en 280.53 $tonCO_2$. Así, en total para la línea base la captura anual es de 343.73 $tCO_2\ año^{-1}$.

- **Regulación del clima (Local)**

Las Islas de Calor Urbanas (ICU) son una de las consecuencias de los desarrollos urbanos. Éstas se relacionan con los cambios en las propiedades tanto térmicas como de irradiación de las obras de infraestructura, debido al almacenamiento de calor en materiales como asfalto y concreto. Estos materiales, por no ser permeables modifican el flujo de energía y ocasionan cambios en el clima a escala local. Al respecto, para Ciudad Verde se evalúa el efecto Isla de Calor Urbana de tipo superficial, a través de mediciones indirectas desarrolladas con base en imágenes Landsat 8. Para esto, de las imágenes disponibles en dicha base, se seleccionaron las tomadas el día 10 de julio de 2019, ya que son las únicas de este año que no se encuentran obstruidas por nubes. Por medio de geoprocesamientos en ArcGIS, se obtuvo el Índice Normalizado de Vegetación (Normalized Difference Vegetation Index-NDVI), el cual es ampliamente aceptado como uno de los indicadores de mayor utilidad para estudiar las características de las coberturas de la tierra, así como su dinámica. Los valores altos de NDVI se asocian a alta presencia de vegetación, por lo tanto, son espacios en los cuales se genera transferencia de calor hacia la atmósfera, por medio de los procesos de transpiración, lo que hace que la temperatura de la superficie disminuya [2]. Como se puede observar en la Figura 6, los valores altos de NDVI de Ciudad verde, coinciden con espacios como parques. Los valores más bajos se encuentran en el pondaje, zonas construidas y el Parque de la Niebla, con lo cual se confirma el alto grado de pérdida de cobertura vegetal en estas zonas.

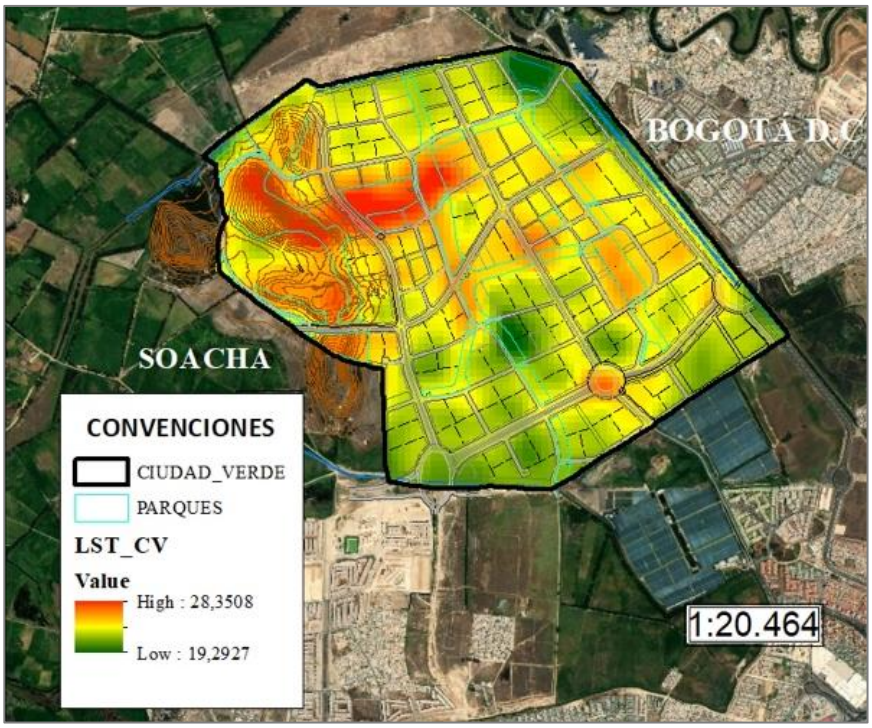


Figura 5. Temperatura superficial, Ciudad Verde. Fuente: Elaboración propia a partir de Landsat 8 (10/07/2019)

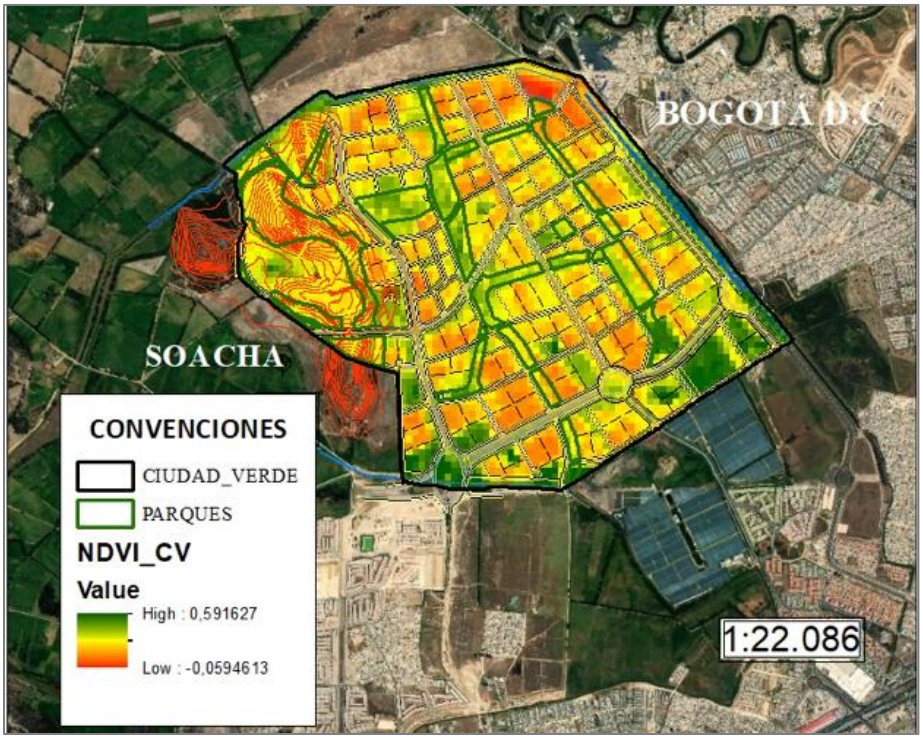


Figura 6. Normalized difference vegetation index, Ciudad Verde. Fuente: Elaboración propia a partir de Landsat 8 (10/07/2019)

La temperatura de la superficie de la tierra (Land Surface Temperature LST) se presenta en grados centígrados. La temperatura máxima es de alrededor de 28.4°C y la mínima de 19.3°C (Figura 5). Las zonas con menor temperatura se correlacionan con los espacios verdes, la ronda del río y el pondaje, mientras las de mayor temperatura se encuentran en algunas zonas construidas, el Parque de la Niebla y otros espacios que se encuentran sin cobertura vegetal, lo cual coincide con los resultados obtenidos en el NDVI (Figura 6).

- **Resultados de la evaluación comprensiva difusa**

Con los valores estimados de cada uno de los indicadores propuestos para este sector, se procedió a realizar la evaluación difusa, tal como se presentó en el capítulo 2. Esta evaluación de los indicadores se realiza haciendo uso de las etiquetas lingüísticas definidas, como lo plantea la metodología propuesta, con el objetivo de dar cuenta del desempeño de los indicadores. Para este caso de estudio, las etiquetas lingüísticas definidas para evaluar el desempeño de los indicadores son: “Muy Malo”, “Malo”, “Regular”, “Bueno” y “Muy Bueno”. Para los indicadores se definieron funciones de pertenencia tipo trapecio o triangulares que caracterizan a cada una de las etiquetas lingüísticas establecidas para el proceso de evaluación. Cada sector estableció los parámetros de cada una de estas funciones de pertenencia con el objetivo de poder realizar la definición matemática de las mismas.

La Figura 7 presenta el resultado de evaluación de los 9 indicadores considerados por el sector Ecología urbana, 4 de ellos de tipo cualitativo y 5 de tipo cuantitativo. De la figura se puede analizar que el indicador “Área verde pública por habitante” tiene asociadas en su evaluación dos valoraciones lingüísticas con diferente grado de pertenencia, indicando que dicho indicador presenta cualidades asociadas a ambas etiquetas lingüísticas. Para este caso, el indicador tiene una

evaluación de “Malo”, dado el mayor grado de pertenencia asociado a dicha etiqueta, con una tendencia a “Regular”. Finalmente, se puede observar que los indicadores restantes fueron evaluados con un 100% de pertenencia a las diferentes etiquetas lingüísticas utilizadas para la evaluación. Por ejemplo, el indicador “Regulación clima (Local)” pertenece en un 100% a la etiqueta “Muy Malo” mientras que el indicador “Accesibilidad social” pertenece en un 100% a la etiqueta “Muy Bueno”.

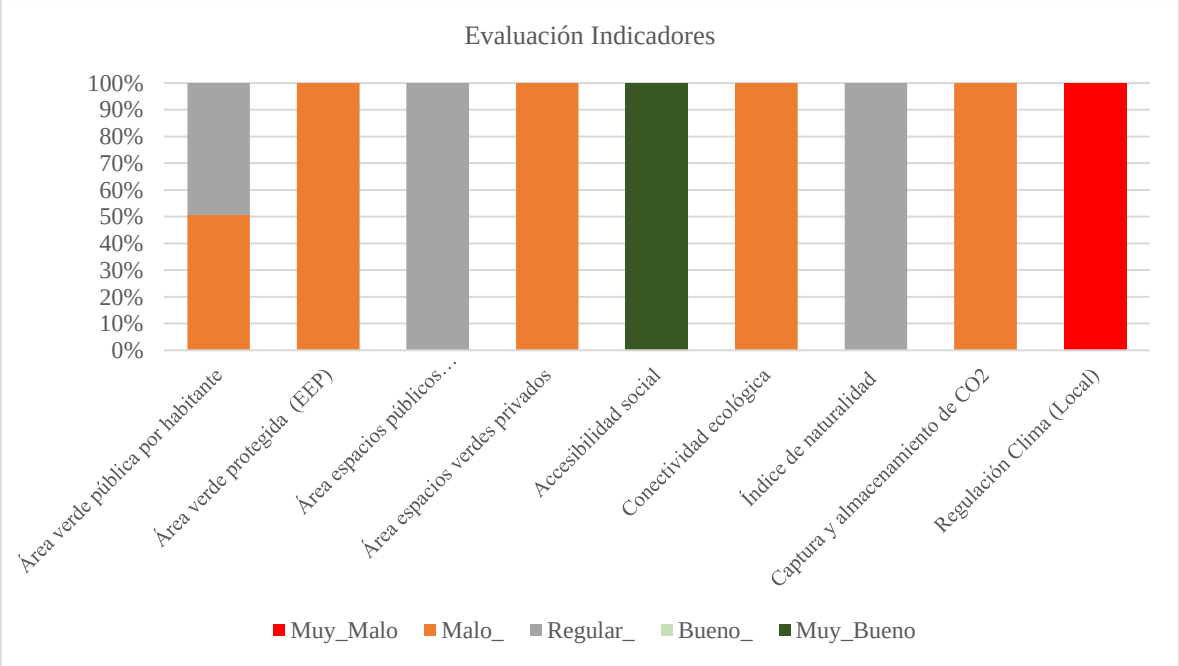


Figura 7. Evaluación de indicadores sector ecología urbana

En la Tabla 3 se presenta la evaluación final y los grados de pertenencia asociados a cada uno de los indicadores basado en los resultados descritos anteriormente. Es así como este sector tiene un indicador evaluado como “Muy Bueno”, 2 indicadores evaluados como “Regular”, 5 indicadores evaluados como “Malo” y finalmente, un indicador evaluado como “Muy Malo”. De esta manera la metodología permite identificar los indicadores que requieren atención prioritaria con el objetivo de mejorar el desempeño del macroproyecto o ciudadela. Acorde con los resultados obtenidos de la evaluación de los indicadores, el sector ecología urbana para este caso de estudio en particular, tiene 6 indicadores evaluados como “Malo” y “Muy Malo” y de esta manera los tomadores de decisiones pueden evaluar posibles acciones de mejora basado en dichos resultados.

Tabla 3. Evaluación final de indicadores sector ecología urbana: grado de pertenencia y etiqueta lingüística

Indicador	**Grado de pertenencia**	**Etiqueta lingüística de evaluación**
Área verde pública por habitante	0.507	Malo
Área verde protegida (EEP)	1.000	Malo
Área espacios públicos infraestructura verde por habitante	1.000	Regular
Área espacios verdes privados	1.000	Malo
Accesibilidad (Social)	1.000	Muy Bueno
Conectividad ecológica	1.000	Malo
Índice de naturalidad	1.000	Regular
Captura y almacenamiento de carbono	1.000	Malo
Regulación Clima (Local)	1.000	Muy Malo

Posteriormente, con la evaluación difusa realizada para los indicadores, se procedió a la evaluación de cada una de las etapas definidas por cada sector, tal como se describió en la sección 2.5.1 del presente informe. Cabe aclarar, que la etapa "Ciudad con espacio público" y el indicador asociado "Área de espacio público total / habitante" presentado en el capítulo 2 no se considera para la evaluación de este caso de estudio en particular.

Tal como lo describe la metodología de evaluación difusa, en la Tabla 4 se presentan los pesos o ponderaciones para los indicadores acorde con las etapas definidas. Además, de la Tabla 4 se puede observar que para este sector se establecieron pesos o ponderaciones iguales para cada uno de los indicadores considerados en las 5 etapas.

Tabla 4. Pesos asignados a los indicadores según la etapa sector ecología urbana

Indicador	**Etapas**				
	Ciudad con espacio público verde	**Ciudad con estructura ecológica principal**	**Ciudad con estructura ecológica integral (áreas verdes diferenciadas y complementarias)**	**Ciudad con funcionalidad social y ecológica**	**Ciudad social y ecológicamente funcional y resiliente**
Área verde pública por habitante	100%	50%	25%	14.29%	11.11%
Área verde protegida (EEP)		50%	25%	14.29%	11.11%
Área espacios públicos infraestructura verde por habitante			25%	14.29%	11.11%
Área espacios verdes privados			25%	14.29%	11.11%
Accesibilidad (Social)				14.29%	11.11%
Conectividad ecológica				14.29%	11.11%
Índice de naturalidad				14.29%	11.11%
Captura y almacenamiento de carbono					11.11%
Regulación Clima (Local)					11.11%

Como último paso, se obtiene la evaluación final de cada una de las etapas definidas para este sector en un rango de 0 a 100%. Tal como se detalló en la sección 2.6.1 de este informe, esta evaluación final está determinada por los conjuntos difusos definidos para tal fin. Por lo tanto, la categorización acorde con las etiquetas lingüísticas establecidas dependerá del nivel de exigencia en cada una de dichas etapas. Por ejemplo, en este sector para que una etapa sea evaluada como "Bueno" debe tener una evaluación en porcentaje superior al 70%. La Tabla 5 presenta los resultados de la evaluación final de cada una de las etapas, y en esta se puede observar que la etapa "Ciudad con espacio público verde" es la que presenta menor calificación con un 39.978% correspondiendo a una evaluación lingüística de "Malo" con un grado de pertenencia de 0.501. Sin embargo, se puede observar que dicha etapa tiene una tendencia a la etiqueta lingüística "Regular" con un grado de pertenencia de 0.499. Por otro lado, la etapa "Ciudad con funcionalidad social y ecológica" es la que presenta mayor calificación con un 51.550% correspondiendo a una evaluación de "Regular" con una tendencia a "Malo", tal como se presenta en la Tabla 5. Cabe resaltar que para las etapas consideradas se puede analizar la influencia que cada uno de los indicadores tiene sobre la misma basado en la evaluación difusa y los pesos asociados a dichos indicadores. Por ejemplo, para la evaluación de la etapa "Ciudad con estructura ecológica integral" se consideran los 4 primeros indicadores con sus respectivos pesos, tal como se presenta en la Tabla 4. De estos 4 indicadores, como se presenta en la Tabla 3, los indicadores "Área verde pública por habitante", "Área verde protegida" y "Área espacios verdes privados" son evaluados como "Malo", y por lo tanto para tener una mejora en dicha etapa se deben tomar principalmente medidas de mejora respecto a estos tres indicadores.

Tabla 5. Evaluación final de las etapas sector ecología urbana

Etapa	Valoración etapa (%)	Etiquetas de evaluación				
		Muy Malo	Malo	Regular	Bueno	Muy Bueno
Ciudad con espacio público verde	**39.978**	0.000	**0.501**	0.499	0.000	0.000
Ciudad con estructura ecológica principal	**45.770**	0.000	**0.711**	0.289	0.000	0.000
Ciudad con estructura ecológica integral (áreas verdes diferenciadas y complementarias)	**48.041**	0.000	**0.508**	0.492	0.000	0.000
Ciudad con funcionalidad social y ecológica	**51.550**	0.000	0.292	**0.708**	0.000	0.000
Ciudad social y ecológicamente funcional y resiliente	**48.048**	0.000	**0.526**	0.474	0.000	0.000

A manera de conclusiones generales se puede decir que la evaluación de los indicadores en Ciudad Verde permitió evidenciar que, en relación con la disponibilidad de áreas verdes, el proyecto cuenta con el equivalente a 5.99 m^2 de área verde pública por habitante lo que se encuentra por debajo de los 10 a 15 m^2 por habitante recomendados por la OMS. Una pequeña parte (9% del total) corresponde a áreas protegidas y 1.68 m^2/hab a espacios verde asociados al sistema vial. Los 3.77 m^2/hab restantes, correspondientes a espacio verde público efectivo, valor que está levemente por debajo de los 4 m^2 por habitante recomendado por las Naciones Unidas. Estas áreas corresponden a parques tanto zonales y metropolitanos (Parque de la Niebla) que cuentan con una accesibilidad a 300 y 2000 metros respectivamente para el 100% de las unidades de vivienda del proyecto. Dado que a la fecha no se cuenta con proyectos paisajísticos o de arborización para las diversas áreas verdes, es difícil estimar el área de endurecimiento de superficies y por ende de naturalidad. Al aproximarse al indicador mediante proxys se estima que un 84% de las áreas no se endurecerá lo que se encuentra por encima del valor recomendado del 80%. En cuanto a los indicadores relacionados con servicios ecosistémicos, se estima que los espacios verdes capturan actualmente 343.73 tCO2, valor que es considerado "Malo", ya que la cobertura arbórea que permite una mayor captura es de apenas 6.15 ha, lo que corresponde a un 4% de las áreas verdes públicas. Finalmente, la diferencia en la temperatura superficial, que se relaciona principalmente con la falta de cobertura vegetal, y con los materiales utilizados para las construcciones llega a ser de más de 9ºC, valor que es bastante alto si se tiene en cuenta que lo deseable es que este no supere los 3ºC.

6.1.2. Manejo integrado del agua

Los indicadores calculados para Ciudad Verde se resumen en la Tabla 6. A su vez, en la Figura 8 se presentan los indicadores normalizados de acuerdo con una escala del 0 a 100%. La normalización se realiza de acuerdo con la Ecuación 1[1]. Así mismo, la ficha técnica de cada indicador se presenta en los anexos del capítulo 2 del presente informe.

$$I_{a_n} = \frac{I_a - V_{a\ min}}{V_{a_{max}} - V_{a\ min}} \qquad 1$$

Donde: I_{a_n}= Indicador normalizado, I_a= Valor del indicador, $V_{a\ min}$= Valor mínimo del indicador, y $V_{a_{max}}$= Valor máximo del indicador o estándar.

[1] Debido a que un menor valor del indicador de asequibilidad al servicio de agua y alcantarillado representa un mayor grado de sostenibilidad, el índice normalizado corresponde a la resta del 100% y el resultado de la Ecuación 2.

Los resultados evidenciaron dificultades en la gestión de la demanda de agua, puesto que los dos indicadores calculados (i.e., consumo promedio de agua potable por habitante y asequibilidad al servicio de agua y alcantarillado) sugieren que hay limitaciones en el uso del agua potable asociadas al costo del servicio. Así mismo, el indicador de agua residual tratada refleja un déficit en su gestión dado que la planeación del desarrollo urbano no involucró una solución en el corto plazo para el tratamiento de las aguas residuales que se generarían. A continuación, cada indicador es analizado a partir del estándar y de las características del macroproyecto.

Tabla 6. Valor de los indicadores para Ciudad Verde

Indicador	**Valor**	**Unidades**
Consumo promedio de agua potable por habitante	54.77	Litros/habitante/día
Agua aprovechada y reutilizada a nivel residencial	20.97	%
Cumplimiento de la calidad requerida del agua	93.14	%
Asequibilidad al servicio de agua potable y alcantarillado	Estrato 1 = -2.71^{AR}, -5.62^{NAR} Estrato 3 = -69.09 ^{AR}, 13.05^{NAR}	%
Razón entre el porcentaje de escorrentía descargada antes y después de la urbanización	1.47	-
Agua residual tratada al nivel de calidad requerido	0.00	%
Emisiones de $CO_{2\text{-eq}}$ por la gestión del agua urbana	0.00074	$tCO_{2\text{-eq}}/m^3$/año
Conciencia pública	78.74	%
Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento	Muy alto	(-)
Calidad del cuerpo de agua receptor	36.17	%
Uso multifuncional de la infraestructura verde para el manejo de la escorrentía	Muy bajo	(-)
Confiabilidad del sistema de drenaje	TR5D6 = 99.62 Periodo extendido = 99.67	%

AR = Considerando el arriendo/cuota de hipoteca, NAR = Excluyendo el arriendo/cuota de hipoteca, TR5 = Periodo de retorno de 5 años, D6 = Duración de 6 horas

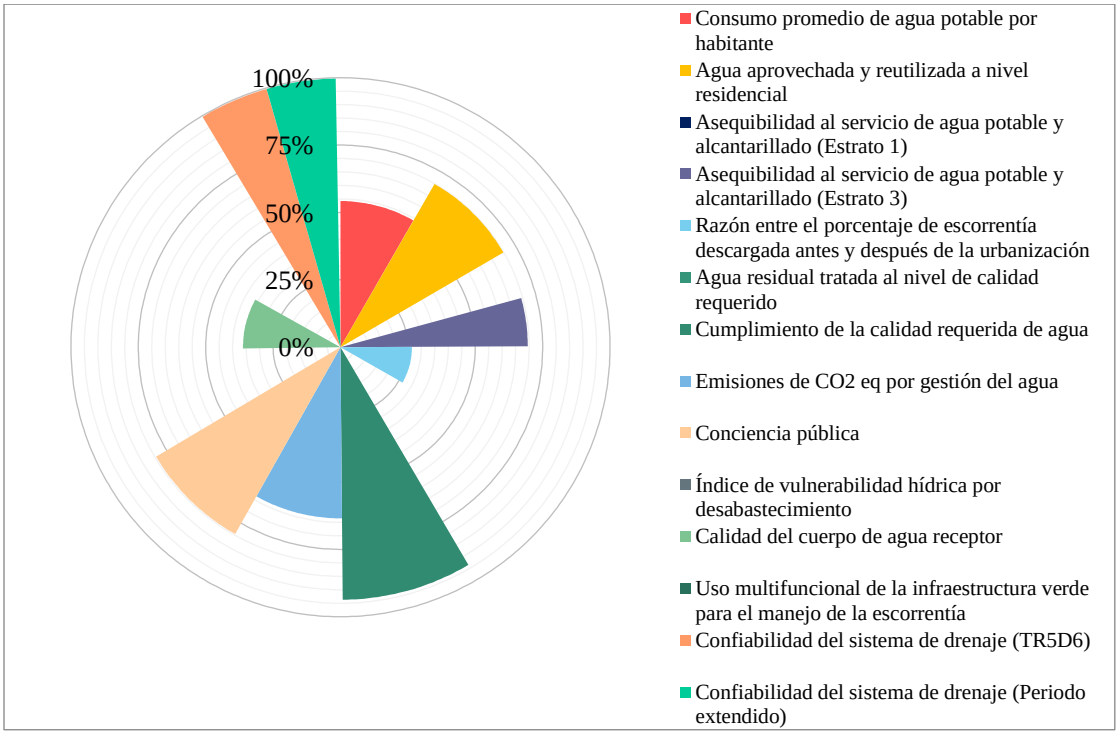


Figura 8. Resultados preliminares de los indicadores para Ciudad Verde.

- **Consumo promedio diario de agua potable por habitante**

La información del consumo de agua potable residencial facturado a cada usuario de Ciudad Verde fue suministrada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAB-ESP), la cual está a cargo del suministro de agua potable en la zona. Los datos proporcionados corresponden al consumo de los usuarios en el 2018. De esta manera, para el cálculo del consumo per-cápita se asumió una composición del hogar de 3.55 personas. Debido a que este desarrollo urbano es reciente y los conjuntos residenciales se están terminando de habitar, se descartó información en la que se identificaron variaciones altas en los consumos bimensuales puesto que en estos casos el consumo reportado puede no ser representativo al corresponder a unidades de vivienda en las que ha habido variaciones en el número de habitantes (cuando la desviación en el consumo reportado para el año correspondía a datos atípicos[2], se descartó dicho consumo).

Como resultado, se obtuvo un consumo per-cápita promedio de 54.77 L/habitante/día. Según esto, en Ciudad Verde se usa el agua de manera eficiente a nivel residencial pues el valor obtenido es menor a 100 L/habitante/día. El consumo promedio calculado es cercano al límite sugerido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para satisfacer las necesidades básicas de consumo e higiene personal (50 L/habitante/día). Adicionalmente, dicho valor es menor al valor reportado para Bogotá, el cual corresponde a 74.32 L/habitante/día [6]. Es importante resaltar que se debe realizar un análisis en conjunto con otros indicadores para concluir si factores como la accesibilidad, el costo del servicio y la existencia de otras fuentes de agua están influyendo en el patrón de consumo. En las siguientes secciones se realiza un análisis del consumo en conjunto con otros indicadores.

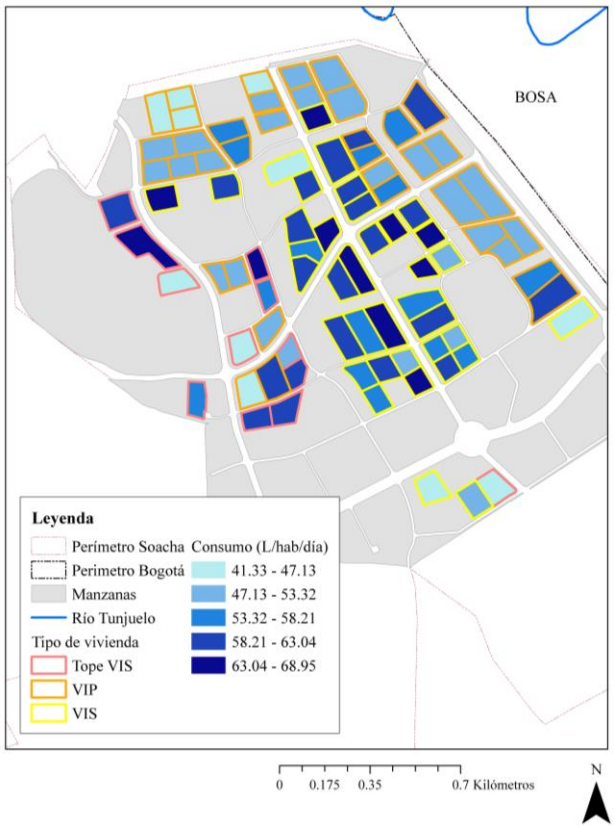


Figura 9. Variación espacial del consumo de agua potable en usos residenciales

[2] Los datos atípicos corresponden a los mayores a 1.5 multiplicado por el rango intercuartil sumado al cuartil 3.

En la Figura 9 se presenta la distribución espacial del consumo de agua potable a nivel residencial. Dicho consumo varía entre 41.33 L/habitante/día y 68.95 L/habitante/día. En todos los casos, el consumo promedio está por debajo del estándar seleccionado para este indicador. Se observa una heterogeneidad en el consumo per-cápita del recurso en los conjuntos que componen Ciudad Verde. Los mayores consumos se presentan en las dos unidades residenciales estrato 1 tipo VIP, que cuentan con el beneficio del mínimo vital (i.e. subsidio que otorga 6 m^3 de agua bimensuales, sin costo, a los usuarios residenciales de estratos 1 y 2) y en las unidades residenciales VIS. Los menores consumos se perciben en las unidades residenciales VIP estrato 3.

- **Agua aprovechada y reutilizada**

La información relacionada con el uso alterno de fuentes de agua en unidades residenciales se recolectó mediante la encuesta aplicada a los habitantes de Ciudad Verde. En esta se indagó acerca del reúso del agua (i.e. si los habitantes realizan aprovechamiento mediante algún sistema y que fuentes utilizan). Como resultado se obtuvo un valor promedio de agua aprovechada y reutilizada del 20.97%. Este valor corresponde a una aproximación a partir de los usos que se le da al agua gris reutilizada y al agua lluvia aprovechada. Se establece mediante la proporción de encuestados que utilizan fuentes no potables y la proporción de agua destinada a cada uso de acuerdo con la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA) [7]. Se identificó que la principal fuente alternativa de agua utilizada es el agua gris proveniente de la lavadora y de la ducha. Dicha agua es utilizada sin ningún tipo de tratamiento principalmente para descargar el sanitario, lavar el piso y la ropa de las unidades residenciales. Adicionalmente, 33% de los habitantes que no aprovechan o reúsan el agua manifestaron que el motivo es la falta de espacio y el 24% no lo hacen porque no les parece necesario o perciben que usar fuentes alternativas no genera ninguna disminución en el valor del agua facturado.

Adicionalmente, se puede concluir que existe un potencial de sustituir un porcentaje adicional del agua potable con agua lluvia, pues esta fuente no está siendo utilizada por los habitantes en la actualidad (tan solo el 2% de las personas hacen uso de dicha fuente). Esto solo es posible si se genera un alto grado de aceptabilidad por parte de los habitantes de Ciudad Verde de implementar sistemas que permitan el aprovechamiento del agua lluvia. Particularmente, las personas encuestadas manifestaron que estarían dispuestas a utilizar el agua lluvia tratada para regar jardines (29%), lavar el piso de las unidades residenciales (39%) y descargar el sanitario (83%). En general, existe un interés por parte de los habitantes por ahorrar agua potable debido a los altos costos del servicio de acueducto y alcantarillado y por la preocupación por el medio ambiente. Esto también se manifestó en los resultados obtenidos en los grupos focales realizados en la zona. Aun así, en la actualidad existen barreras culturales que limitan el uso de fuentes de agua alternativas. Por ejemplo, las personas que no usan agua gris o agua lluvia manifestaron preocupaciones por la higiene (15%), percepción de mayores costos en el hogar (7%) y preocupación por los posibles riesgos a la salud (4%).

- **Cumplimiento de la calidad requerida del agua**

Se utilizó información de los muestreos de agua potable realizados por la EAB-ESP en el área de Ciudad Verde durante el 2018. De acuerdo con los datos disponibles y las características del área se consideraron los determinantes cuya frecuencia mínima de muestreo se establece en la resolución 2115 de 2007 como mensual o semanal (i.e. color aparente, turbiedad, pH, cloro residual, alcalinidad total, zinc, dureza total, sulfatos, hierro total, cloruros, nitratos, nitritos y aluminio), así como coliformes y E. coli. Para el cálculo del indicador solo se tuvieron en cuenta las muestras en las que se reportan valores para todos los determinantes de interés. No se analiza la calidad del agua

para usos no potables que proviene de sistemas de aprovechamiento y reúso porque no hay información disponible en el área.

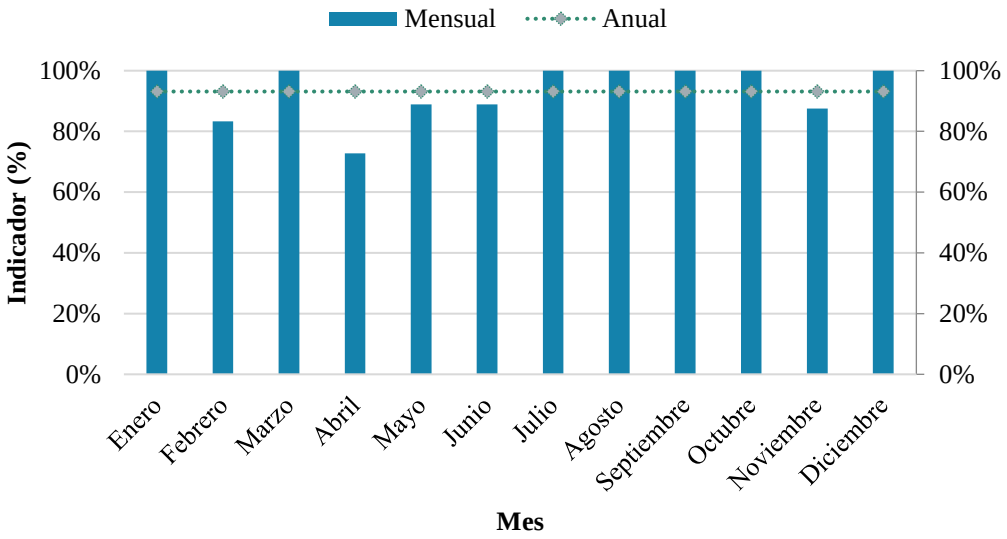


Figura 10. Valores mensuales del indicador de cumplimiento de la calidad requerida para el año 2018 en Ciudad Verde.

Un total de 102 muestras fueron consideradas y como resultado se obtuvo un valor de 93.14% para el indicador en el macroproyecto. Los siete (7) casos en los que las muestras no cumplen con los valores mínimos de calidad corresponden a casos en los que se reportó presencia de coliformes totales o un valor mayor o igual a 1 microorganismo en 100 cm^3. Cabe anotar que en ningún caso se identificó presencia de E. coli. Como se evidencia en la Figura 10, durante el primer semestre del año se presentaron los menores valores para el indicador analizado. Por otro lado, en el año 2018 el valor del indicador para el agua potable suministrada por el acueducto de Bogotá en el municipio de Soacha es 96.97%. Si bien, los valores establecidos para Ciudad Verde y Soacha manifiestan que se está suministrando agua apta para usos potables la mayor parte del tiempo, los indicadores evidencian que en Ciudad Verde hay una mayor proporción de casos en los que las muestras no cumplen con el estándar.

- **Asequibilidad al servicio de agua y alcantarillado**

Las tarifas del servicio de acueducto y alcantarillado para las unidades residenciales de estratos 1 y 3, que parten de un cargo fijo y un consumo básico, fueron consultadas con la EAB-ESP. Los ingresos por hogar fueron cuantificados considerando los resultados de la encuesta aplicada a los habitantes de Ciudad Verde. Los gastos esenciales en un hogar por estrato socioeconómico se consultaron en la encuesta multipropósito del 2017 realizada por el DANE [8]. Entre los gastos esenciales se incluyó el gasto por arriendo, electricidad, gas, telefonía, alimentos y bebidas no alcohólicas, vestuario, salud, transporte y educación. Se asumió que los perceptores de ingreso en los hogares corresponden a dos personas, según la encuesta nacional de presupuesto de los hogares realizada en el 2017 por el DANE [9].

Adicionalmente, se establecieron dos valores para el indicador a partir de dos escenarios distintos de gastos. En el primer escenario, el cálculo se hace para personas con vivienda propia, es decir se excluye el gasto de arriendo o hipoteca. En el segundo escenario el cálculo se realiza considerando que los gatos mensuales incluyen el pago de arriendo o hipoteca. Para el caso de las viviendas

estrato 1 se tuvo en cuenta el mínimo vital, el cual corresponde a 6 m^3 de agua bimensuales que se otorgan sin costo a los usuarios residenciales de estratos 1 y 2.

Como resultado, sin considerar el gasto de arriendo o cuota de hipoteca, se obtuvo un valor del indicador de -5.62 % para las unidades residenciales de estrato 1 y de 13.05% para las unidades de estrato 3. Se observa que el resultado obtenido para las unidades de estrato 1 y estrato 3 es mayor que el estándar recomendado (i.e., 10%). En el caso del estrato 1, a pesar de contar con el beneficio del mínimo vital, los ingresos libres de la población no alcanzan para cubrir el gasto asociado al servicio de acueducto y alcantarillado. Por otro lado, considerando el gasto de arriendo o cuota de hipoteca, se obtuvo un valor del indicador de -2.71% para las unidades residenciales de estrato 1 y de -69.06% para las unidades de estrato 3. En este caso los ingresos libres de la población no alcanzan para cubrir el gasto asociado al servicio de acueducto y alcantarillado. Los resultados obtenidos para los dos casos analizados sugieren que la estructura tarifaria afecta la asequibilidad al servicio de agua y alcantarillado en Ciudad verde y, en mayor medida, a los hogares que presentan los menores ingresos. De esa manera, se considera que el recurso es de difícil acceso para la población de Ciudad Verde. Es importante aclarar que el ingreso de la población que habita en viviendas estrato 1 se calculó teniendo en cuenta el resultado de 17 encuestas, por lo que dicho valor no necesariamente es representativo y la estimación del indicador en este caso tiene una alta incertidumbre.

- **Razón entre el porcentaje de escorrentía descargada antes y después de la urbanización**

La escorrentía que se genera en Ciudad Verde es captada por sumideros y transportada mediante tuberías a unas estructuras tipo “box culvert”, que la conducen hasta un pondaje húmedo. En este se almacena temporalmente el agua y luego se descarga al Río Tunjuelo a través de una estación elevadora que posee una capacidad de bombeo de hasta 4 m^3/s. A partir de esta información, el cálculo de la escorrentía generada y descargada en Ciudad Verde se realizó mediante un balance hídrico, ya que no fue posible acceder a información primaria. Para cuantificar el volumen de escorrentía generado se utilizó la Ecuación 2.

$$V_e = P \sum C_i A_i \qquad 2$$

Donde V_e = Volumen de escorrentía generado (m^3/mes), C_i = Coeficiente de escorrentía del área correspondiente, P = Precipitación mensual multianual, y A_i = Área de drenaje (m^2).

La información de precipitación se obtuvo del registro histórico de la estación pluviográfica “Las Huertas” de la EAB-ESP, ubicada cerca a Ciudad Verde. En la Figura 11 se observa el régimen de precipitación de la estación. Los valores de precipitación exhiben un régimen de lluvia bimodal a lo largo del año. En los meses de marzo-abril y de octubre-noviembre se exhiben los valores más altos de precipitación, mientras que los valores más bajos se presentan en los meses de enero-febrero y julio.

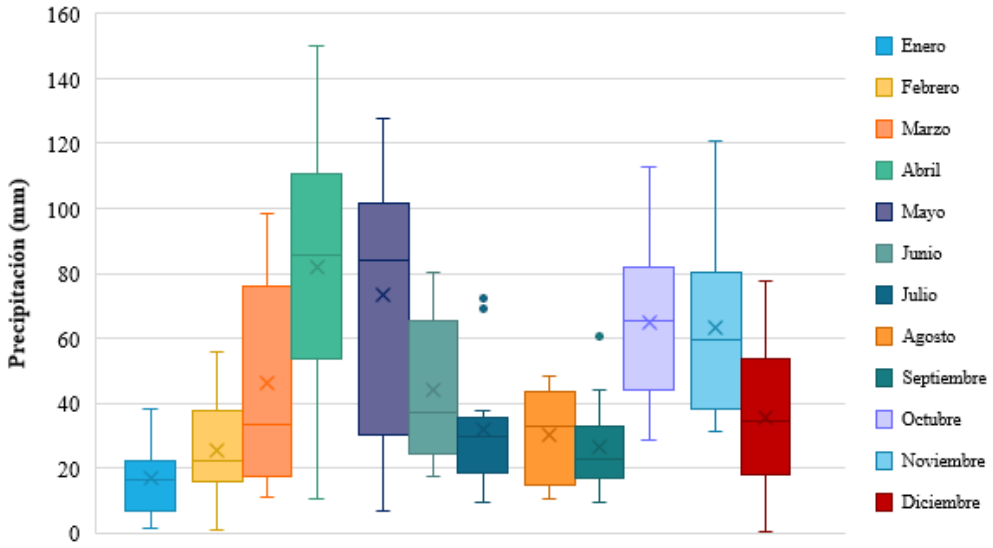


Figura 11. Análisis de la precipitación registrada en la estación "Las Huertas" (2005 – 2018)

Se consideró un coeficiente de escorrentía de 0.85 para zonas impermeables y de 0.2 para zonas permeables, según lo recomendado por la norma técnica NS-085 de la EAB-ESP y por Butler & Davies [10]. De esta manera, el coeficiente de escorrentía promedio en la actualidad se estimó en 0.5. El área de drenaje total correspondió a 3'260,137 m^2, de la cual 1'519,466 m^2 es área impermeable y 1'740,671.4 m^2 es área permeable. La Figura 12 presenta la distribución de dichas áreas.

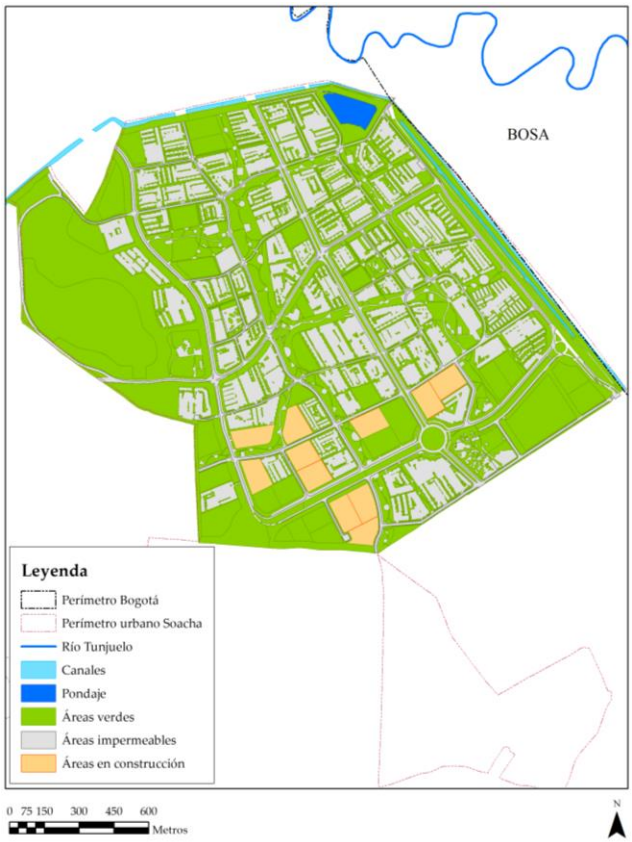


Figura 12. Áreas de drenaje permeables e impermeables de Ciudad Verde para el año 2019

Como se mencionó anteriormente, para la cuantificación del volumen de escorrentía descargado se realizó un balance hídrico. Su formulación se resume en la Ecuación 3.

$$P * C * A - E * A_p + V_s = Al \quad 3$$

Donde $P =$ Precipitación (m), $C =$ Coeficiente de escorrentía promedio (-), $A =$ área de Ciudad Verde (m^2), E = Evaporación (m), $A_p =$ Área del pondaje (m^2), $V_s =$ Volumen de salida de escorrentía (m^3) y $Al =$ Almacenamiento en el pondaje (m^3).

Se asumió que el pondaje se desocupa cada mes, por lo que el almacenamiento al final del mismo es cero. Dicha suposición se realizó por interpretación de la información proporcionada por la EAB-ESP. Los valores de evaporación potencial fueron calculados a partir de la información suministrada por la estación pluviográfica "Las Huertas" y, para el factor del tanque, se asumió un valor de 0.8. Adicionalmente, se realizó una estimación del valor de la escorrentía descargada por el área para las condiciones pre-desarrollo (i.e. cuando no se había construido ningún edificio y/o equipamiento propuesto y el área era principalmente permeable). En la Tabla 7 se resume el resultado de la cuantificación del volumen de escorrentía generado y el volumen de escorrentía descargado al Río Tunjuelo.

Tabla 7. Volumen de escorrentía generado y descargado en Ciudad Verde

Parámetro	**Valor**
Volumen generado de escorrentía en la condición de desarrollo (m^3/año)	887318.03
Volumen descargado de escorrentía en la condición de desarrollo (m^3/año)	868879.20
Volumen de escorrentía generado y descargado en la condición de pre-desarrollo (m^3/año)	352164.69

Como resultado, se obtuvo un valor del indicador de 1.47. Según esto, se observa un aumento en el volumen de escorrentía generado producto de la impermeabilización de los terrenos. De los resultados, se evidencia que la gestión de la escorrentía en Ciudad Verde se centra en recolectarla y transportarla mediante tuberías y canales hacia un pondaje húmedo, para luego almacenarla temporalmente y descargarla al Río Tunjuelo. La disminución de los volúmenes de escorrentía es mínima ya que tan solo el 2.08% del volumen de escorrentía generado no se descarga al río.

Debido a que el manejo de la escorrentía se basa en la concentración de esta en un pondaje para su posterior bombeo al río, el sistema depende de la correcta operación de las bombas. Por este motivo, si se presentan problemas en el sistema de bombeo en un evento extremo de precipitación, la operación de todo el sistema puede verse afectada, lo que llevaría a la generación de encharcamientos e inundaciones. Adicionalmente, ya que toda la escorrentía generada en áreas impermeables es transportada y bombeada al río, si se realiza un manejo de la escorrentía en la fuente se podrían disminuir los costos operativos del sistema de drenaje. En Ciudad Verde existe un potencial de incluir estrategias para el manejo del agua lluvia que consideren el aprovechamiento del agua para usos no potables (p.ej. riego de zonas verdes y limpieza de calles), la detención y la infiltración. Lo anterior, a partir de una red de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que permita que el sistema sea redundante (i.e., si falla un elemento del sistema de drenaje, esto no implica que falle todo el sistema).

Por otro lado, se realizó un estimativo de los caudales pico asociados a la condición pre-desarrollo y desarrollo con el fin de analizar el efecto de la urbanización en los mismos. El caudal pico se cuantificó para un periodo de retorno de 3 y 10 años. El periodo de retorno de 3 años está asociada a los impactos sobre el cuerpo de agua receptor mientras que, el de 10 años, a la inversión en infraestructura de drenaje. De esta manera, el caudal pico se estimó mediante el método racional (i.e., el caudal pico se calcula con base en la intensidad media del evento de precipitación que tiene

una duración igual al tiempo de concentración del área de drenaje). La ecuación de este método se presenta a continuación.

$$Q = 2.78 * CiA \quad (4)$$

Donde $Q =$ Caudal pico de escorrentía (L/s), $C =$ Coeficiente de escorrentía promedio (-), $i =$ intensidad de precipitación para un periodo de retorno específico (mm/hr) y $A =$ Área de drenaje (ha).

Los coeficientes de escorrentía utilizados para calcular el valor promedio en cada condición, según el periodo de retorno, se presentan en la Tabla 8. Estos se establecieron a partir de lo recomendado en la norma técnica NS-085 "Criterios de diseño de sistemas de alcantarillado" de la EAB-ESP.

Tabla 8. Coeficientes de escorrentía según el periodo de retorno

Superficie / Características	**Periodo de retorno**	
	3 años	**10 años**
Permeable / Área sin desarrollar cubierta de pasto	0.28	0.30
Permeable / Área desarrollada cubierta de pasto	0.28	0.30
Impermeable / Área desarrollada en concreto	0.8	0.83

La intensidad de precipitación se aproximó mediante la curva IDF de la estación "Bosa-Barreno", cuya formulación matemática se presenta en la Ecuación 5.

$$I = \frac{1511.9T^{0.143}}{D^{0.99} + 24.6} \quad (5)$$

Donde $I =$ Intensidad del evento de lluvia (mm/hr), $T =$ Periodo de retorno (años) y $D =$ Duración del evento de lluvia (minutos).

El tiempo de concentración se cuantificó mediante la Ecuación 6. Para la condición de pre-desarrollo, el tiempo de entrada (T_e) es aquel que toma el flujo superficial para viajar desde la parte más alejada de la subcuenca hasta el punto de salida y el tiempo de flujo (T_f) es cero. De esta manera, la longitud del curso de agua más largo y la pendiente promedio se cuantificaron mediante la herramienta ArcSWAT, a partir de un Modelo de Elevación Digital (DEM) de la zona. Por otro lado, para la condición de desarrollo, T_e es aquel que toma el flujo superficial para viajar desde la parte más alejada de la subcuenca hasta el punto de entrada al sistema de drenaje y T_f, el tiempo que tarda el agua en recorrer la red de tuberías desde el punto de entrada hasta el punto de salida de la cuenca. El tiempo de entrada se asumió en 20 minutos, según lo mencionado en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) para pozos iniciales [11]. Para el cálculo del tiempo de flujo, la velocidad en las tuberías se calculó mediante el proceso iterativo descrito en el RAS.

$$T_c = T_e + T_f$$

$$T_e = \frac{0.707(1.1 - C) * L^{1/2}}{S^{1/3}} \quad (6)$$

$$T_f = \frac{L_c}{60 * v}$$

Donde $T_c =$ Tiempo de concentración (minutos), $T_e =$ Tiempo de entrada (minutos), $T_f =$ Tiempo

de flujo (minutos), $C =$ Coeficiente de escorrentía, $L =$ Longitud del curso de agua más largo (m), $S =$ Pendiente promedio del cauce principal (m/m), $L_C =$ Longitud del colector (m) y $v =$ velocidad promedio (m/s).

Los caudales pico calculados para la condición de pre-desarrollo y desarrollo, considerando los diferentes periodos de retorno, se presentan en la Tabla 9. De los resultados obtenidos se observa un aumento en el caudal pico generado de 134% y 195% respecto a la condición de pre-desarrollo, para los periodos de retorno de 3 y 10 años, respectivamente. Esto debido a la impermeabilización de los terrenos, lo que lleva a una disminución en los procesos de infiltración. La capacidad de respuesta de Ciudad Verde a los eventos de precipitación en la condición desarrollada es menor respecto al escenario de pre-desarrollo, pues la escorrentía llega más rápido al punto de salida (i.e., los tiempos de concentración son más bajos).

Tabla 9. Caudales pico de escorrentía generados en Ciudad Verde para la condición de pre-desarrollo y desarrollo

Condición	Periodo de retorno (años)	Tiempo de concentración (minutos)	Intensidad (mm/hr)	Caudal pico generado (m^3/s)
Pre-desarrollo	3	115.39	13.14	3.33
	10	76.06	15.92	4.33
Desarrollo	3	112.58	17.11	7.81
	10	82.38	21.57	9.85

En relación con los caudales pico descargados, debido a la presencia del pondaje el máximo caudal que se puede descargar al cuerpo de agua receptor corresponde a 4 m^3/s. Se observó que la presencia de esta estructura en Ciudad Verde atenúa, a partir del proceso de detención, los caudales pico de escorrentía generados en un 49% y 59% para los periodos de retorno de 3 y 10 años, respectivamente. Se realizó un análisis para determinar si el pondaje tiene la capacidad de atenuar el caudal pico al punto de emular la condición de pre-desarrollo (i.e., descargar 3.33 y 4.33 m^3/s en los eventos de lluvia asociados con los periodos de retorno de 3 y 10 años, respectivamente). Para este fin, se utilizó la Ecuación 7, la cual permite calcular el volumen de almacenamiento requerido en el pondaje que permitiría descargar el caudal pico estimado en la condición de pre-desarrollo [12].

$$\frac{S_{max}}{S_R} = 0.922 - 0.787\frac{Q_p}{I_p} \qquad 7$$

Donde $S_{max} =$ Volumen requerido de almacenamiento para manejar el evento de lluvia según las condiciones de entrada y salida (m^3), $S_R =$ volumen de escorrentía generado por el evento de lluvia, $Q_p =$ Caudal pico de salida deseado (m^3/s) y $I_p =$ Caudal pico generado en la condición de desarrollo (m^3/s).

Así pues, para el evento de lluvia asociado con el periodo de retorno de 3 años (i.e., caudal de descarga de 3.33 m^3/s) se requeriría una capacidad de almacenamiento de 22631.7 m^3 mientras que, para el evento asociado con el periodo de 10 años (i.e., caudal de descarga de 4.33 m^3/s), se requeriría una capacidad de 29471.1 m^3. Por tal razón, considerando que la capacidad actual del pondaje es de 28000 m^3/s, esta estructura podría generar una descarga igual a la condición de pre-desarrollo para el evento de lluvia con un periodo de retorno de 3 años.

- **Agua residual tratada al nivel de calidad requerido**

La información acerca del tratamiento de las aguas residuales domésticas en Ciudad Verde fue consultada en la base de datos geográfica de la EAB-ESP. En la actualidad, el agua residual producida en las unidades residenciales es recolectada y conducida mediante tuberías al interceptor

Tunjuelo Bajo, el cual entrega sus aguas al interceptor Tunjuelo Canoas. Finalmente, el agua residual se descarga al Río Bogotá aguas abajo de la represa del Muña. Previo a la descarga no se realiza ningún tipo de tratamiento al agua, por lo que el valor de este indicador en la actualidad es equivalente a 0%. Este valor evidencia que se necesita un esquema adecuado para el manejo de las aguas residuales domésticas con el fin de evitar la contaminación de los cuerpos de agua.

Adicionalmente, el resultado obtenido sugiere que la empresa de servicios públicos de agua enfoca sus esfuerzos principalmente en el suministro de agua potable y en el drenaje. En contraste, no existen procesos idóneos para prevenir problemas ambientales y sociales (p.ej. contaminación de los cuerpos de agua receptores o problemas potenciales de salud pública) que también afectan la sostenibilidad del sistema pero que son potencialmente menos visibles para los usuarios. Si bien se tiene planeado tratar el 100% del agua residual producida en Ciudad Verde en la futura Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Canoas, esta entrará en funcionamiento en varios años, lo que refleja la desconexión que existe entre la gestión de las aguas residuales y la planeación urbana en el área. En futuros desarrollos urbanos sería pertinente que las licencias de urbanización se otorguen una vez se haya garantizado el tratamiento del caudal de aguas residuales proyectado.

Respecto al nivel de calidad requerido del tratamiento, la construcción PTAR Canoas hace parte del Plan de Saneamiento y Recuperación del Río Bogotá. Este contempla la ejecución de diferentes obras de adecuación hidráulica a lo largo del cauce, la ampliación y la adecuación de la PTAR Salitre y la construcción de la PTAR Canoas. Este plan es el resultado de los requerimientos y estrategias establecidas en el CONPES 3320 de 2004 y la sentencia 479 de 2004 para el manejo de la cuenca del río. A su vez, contempla los objetivos de calidad del agua para el Río Bogotá determinados en el Acuerdo 43 del 2006 [13]. En este acuerdo se presenta la identificación de los usuarios del recurso hídrico, la estimación de las cargas contaminantes vertidas al río y el diagnóstico de su calidad en las diferentes partes de la cuenca. Así mismo, se definen los objetivos de calidad del río según su uso, así como diferentes escenarios para su saneamiento.

Considerando lo anterior, la calidad del agua del río Bogotá en el área donde se localiza el vertimiento de la PTAR Canoas debe ser acorde con los estándares para uso de generación de energía. Para cumplir este objetivo de calidad, en un estudio realizado por la Corporación Autónoma Regional (CAR), se establece que los niveles de tratamiento requeridos para todos los efluentes descargados al Río Bogotá requieren un nivel secundario de tratamiento [14]. Esto considerando el análisis de la capacidad de asimilación de contaminantes por parte del río. Dicha conclusión surge de la modelación de diferentes escenarios para evaluar el efecto de las obras planteadas en la calidad del río. En el documento se menciona que implementar un tratamiento secundario en la PTAR Canoas permitiría cumplir con los objetivos para uso de generación de energía o de clase V de calidad. Por lo tanto, teniendo en cuenta la información disponible y los estándares de calidad establecidos para los diferentes usos, con la construcción de la segunda fase de la PTAR Canoas (i.e., que involucra el tratamiento secundario) se alcanzaría el nivel de calidad requerido en el Río Bogotá, en la cuenca baja.

- **Emisiones de $CO_{2\text{-}eq}$ por la gestión del agua urbana**

En la cuantificación de este indicador se incluyeron, en primer lugar, las emisiones asociadas al suministro de agua potable en Ciudad Verde. Entre estas se encuentran las correspondientes a la fabricación e instalación de las tuberías que componen el sistema de distribución, las asociadas al bombeo del agua desde la fuente de captación hasta la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) Wiesner y las relacionadas con el consumo de energía para potabilizar el agua. Es importante aclarar que no hay emisiones asociadas al bombeo del agua desde la PTAP Wiesner hasta Ciudad Verde, pues el recurso se distribuye por gravedad. En segundo lugar, se incluyeron las

emisiones asociadas al manejo de la escorrentía. Entre estas se encuentran las emisiones correspondientes a la fabricación e instalación de las tuberías y los canales que componen el sistema de drenaje pluvial, así como las emisiones asociadas al bombeo de la escorrentía en su descarga al Río Tunjuelo. Por último, se consideraron las emisiones relacionadas con manejo de las aguas residuales en Ciudad Verde, que están representadas por la fabricación e instalación de las tuberías que componen el sistema de drenaje sanitario y el vertimiento de las aguas residuales al Río Bogotá. La sección 6.2 contiene información detallada de la cuantificación de las emisiones.

Como resultado, se obtuvo un valor del indicador de 0.00074 toneladas de $CO_{2\text{-}eq}$ por m^3 de agua por año, lo que equivale a 0.019 toneladas de $CO_{2\text{-}eq}$ por habitante para el 2018. Del total de emisiones de GEI asociadas a la gestión del agua en Ciudad Verde, el 84.9% están asociadas al uso de energía para el bombeo y el tratamiento del agua, el 8.9% al vertimiento de aguas residuales sin tratar y el 6.2% a la construcción, transporte e instalación de los sistemas de distribución y drenaje. De los resultados obtenidos se puede mencionar que mejorar la eficiencia en el uso de la energía en procesos como el tratamiento o el bombeo del agua permitiría para reducir las emisiones de GEI asociadas al manejo del agua. Adicionalmente, la reducción de las fugas en el sistema de distribución de agua potable, que representan el 39% del total de agua distribuida para Bogotá, constituye una forma potencial de reducir las emisiones de GEI y los costos de operación del sistema.

- **Conciencia pública**

La información relacionada con la conciencia pública en torno a la gestión del agua se cuantificó mediante los resultados de la encuesta aplicada a los habitantes de Ciudad Verde. En esta se indagó acerca de la responsabilidad que sienten las personas por participar en la toma de decisiones sobre el recurso hídrico y en la conservación del mismo. Como resultado se obtuvo un valor de conciencia pública del 78.74%. Es necesario mencionar que estos resultados son subjetivos y dependen de la interpretación de cada persona sobre la pregunta realizada. Aunque los resultados indican un valor alto de conciencia pública, los habitantes asocian el manejo del agua urbana en mayor medida a la gestión de la demanda de agua potable, lo cual se manifiesta en las medidas adoptadas para ahorrar agua. Por ejemplo, el 93% de los encuestados utiliza medidas en las que se reduce el tiempo de uso de los grifos y duchas (i.e. duchas de cinco minutos y cierre de grifos). En contraste, el 53% de las personas encuestadas señalaron no conocer la existencia de del pondaje que almacena el agua lluvia. De esta forma, existe un potencial para mejorar la participación comunitaria y la conciencia de la educación ambiental en torno al manejo del agua de escorrentía.

- **Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento**

Si bien el agua potable que es proveída a Ciudad Verde no corresponde a agua tratada del Río Bogotá, para el análisis del indicador se consideró que la fuente principal de agua de la cuenca en la que está localizada la ciudadela corresponde al Río Bogotá. De esta manera, el indicador se estableció a partir de la información disponible de caudales medios diarios de la estación de la CAR "Puente Florencia" localizada aguas arriba de la PTAP Tibitoc, para el periodo 1989-2019. A su vez, la demanda de agua para el año 2018 se calculó considerando la demanda de la ciudad de Bogotá, así como de los sectores de Soacha y de otros municipios aledaños que son abastecidos por la EAB, de acuerdo con reportes del Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios (SUI). Como resultado se obtuvo que en la cuenca la vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento es muy alta. Los valores de los indicadores intermedios calculados fueron de 0.84, para el índice de regulación hídrica, y 818%, para el índice de uso del agua en año seco.

La regulación hídrica es alta en la zona, puesto que el valor del índice es mayor a 0.70. Así mismo, la curva de duración de caudales (ver Figura 13) caracteriza un régimen tranquilo, en el cual el caudal promedio es igualado o excedido el 44.3% del tiempo. Sin embargo, el valor del índice de uso de agua corresponde a un valor crítico (i.e., mayor a uno) y evidencia la problemática que hay en el abastecimiento de la cuenca. Cabe anotar que este valor también es crítico si se analiza el caudal promedio, ya que para ese caso el valor del indicador es 241%. Esto se debe al trasvase de cuenca que es determinante en el suministro de agua en Bogotá, ya que las principales fuentes de abastecimiento corresponden al sistema Tibitoc y al sistema Chingaza. El agua tratada en el sistema Tibitoc proviene en su mayoría del Río Bogotá. Sin embargo, en el sistema Chingaza parte del agua tratada corresponde a captaciones del Río Blanco y Río Guatiquía, que alimentan el embalse de Chuza y hacen parte de la cuenca del Río Meta [15]. Para el año 2018, el 87.4% del agua captada por el sistema Chingaza provino del embalse de Chuza. A su vez, este sistema proveyó el 61.7% del agua suministrada por las plantas de tratamiento de la EAB [16]. Por este motivo es importante desarrollar una gestión de la demanda de agua en la cuenca que permita garantizar el suministro en el largo plazo y disminuir los impactos sobre otras cuencas. En este sentido, en Ciudad Verde el uso de fuentes alternativas de agua es fundamental, por lo que es importante considerar esquemas descentralizados que incluyan el uso de agua gris, así como otras fuentes de agua superficiales.

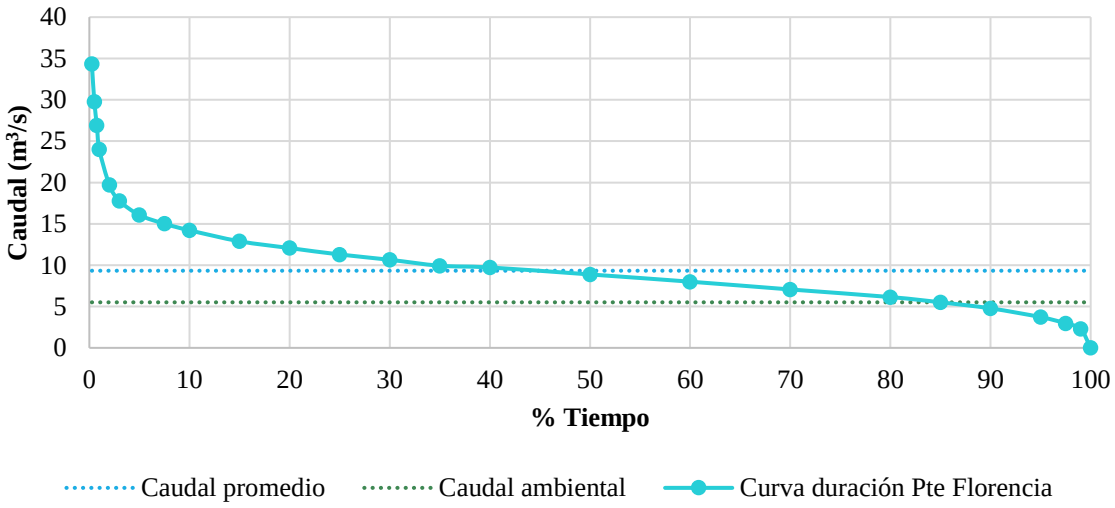


Figura 13. Curva de duración de caudales Estación puente Florencia

- **Calidad del cuerpo de agua receptor**

En el caso de Ciudad Verde, el cuerpo de agua receptor corresponde al Río Bogotá. Así pues, para el cálculo de este indicador se utilizó información de calidad hídrica reportada en la campaña de monitoreo realizada por la Dirección de Laboratorio e Innovación Ambiental de la CAR en el segundo semestre del 2018 [17]. Se consideraron los muestreos realizados en la estación "Las Huertas", ubicada aguas abajo de Ciudad Verde y como resultado se obtuvo un valor del indicador de 36.17%. Considerando la categorización propuesta por el IDEAM, la calidad del agua del Río Bogotá a la altura de la ciudadela se clasifica como mala.

La mala calidad del agua se debe al vertimiento de las aguas residuales parcialmente tratadas Bogotá y a la entrada de diversos afluentes receptores de aguas residuales (p.ej., Río Tunjuelo). Debido a que el agua residual producida en Ciudad Verde se descarga al Río Bogotá sin ningún tipo de tratamiento, este desarrollo también contribuye a la contaminación del río. El valor obtenido

evidencia que se necesita un esquema adecuado para el manejo de las aguas residuales tanto de Bogotá como de Ciudad Verde, con el fin de reducir el impacto ambiental de los desarrollos urbanos en la calidad del río. Se requiere un mayor compromiso y responsabilidad interinstitucional en el desarrollo de obras para el tratamiento de las aguas residuales tanto en nuevos desarrollos como en los existentes. Adicionalmente, se deben implementar otras estrategias para la descontaminación y recuperación del Río Bogotá.

- **Uso multifuncional de la infraestructura verde para el manejo de la escorrentía**

En Ciudad Verde se cuenta con un pondaje para el almacenamiento temporal de agua lluvia, el cual permite amortiguar los eventos de precipitación y realizar una descarga controlada al Río Tunjuelo. Sin embargo, el uso multifuncional de esta estructura es muy bajo indicando que objetivos adicionales al control de inundaciones no fueron considerados para su implementación. En general, el uso por parte de la población se encuentra limitado por la falta mobiliario y la presencia de un cerramiento (ver Tabla 10). Esto se refleja en un bajo conocimiento sobre la estructura por parte de los habitantes de la ciudadela. Por ejemplo, el 46.5% de la población encuestada manifestó que no sabía de la existencia del pondaje húmedo. Por otro lado, aunque la tipología tiene un potencial alto para la creación de ecosistemas, no contribuye a la conectividad de elementos naturales y construidos que hacen parte de la infraestructura verde y la estructura ecológica principal (EPP) como el humedal Tibanica, el canal Tibanica y los corredores verdes. En la Tabla 11 se resumen las calificaciones asignadas a los criterios de biodiversidad.

Tabla 10. Uso población: calificación asignada a los criterios

Aspecto	Criterio	Observaciones	Puntaje
Uso recreativo	Área circundante	El pondaje se encuentra cerrado con polisombra. Esto limita su relación con las zonas adyacentes en las cuales no hay mobiliario u otros elementos que permitan la recreación activa o pasiva	0
	Uso seco (tipologías)	El área de la única tipología de SUDS empleada en el proyecto no puede ser utilizada en tiempo seco	0
Otros usos	Control tráfico	No se ubican tipologías de SUDS provistas de vegetación en separadores	0
	Parqueo	No se ubican tipologías de SUDS en parqueaderos o bahías	0
Relación con el agua	Posible*	No se generan condiciones para interactuar de manera directa o indirecta con el pondaje	0
	Segura	No hay control de la escorrentía en la fuente, no hay trenes de tratamiento y no hay pretratamiento para la escorrentía que entra al pondaje	0
	Visitas	La población del macroproyecto no puede visitar el pondaje ya que este se encuentra cerrado por una polisombra	0

Tabla 11. Biodiversidad: calificación asignada a los criterios

Criterio	Evaluación	Puntaje
Creación de hábitat	La tipología de SUDS tiene un potencial alto para la creación de hábitats	3
Conectividad	La tipología de SUDS no contribuye a la conectividad de áreas verdes o cuerpos de agua	0
Restauración	Se remueven solidos a partir de sedimentación y mediante una rejilla ubicada antes de la bomba	1

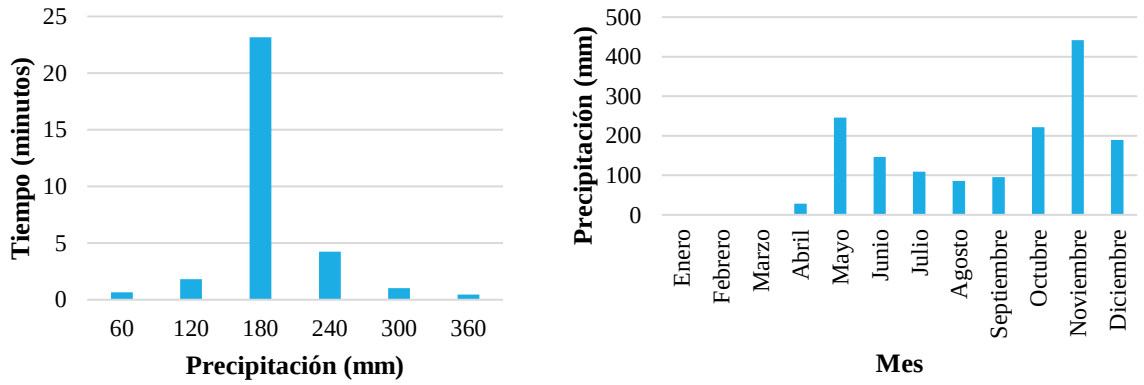
Para que exista un uso multifuncional del pondaje es necesario realizar modificaciones que permitan incrementar la interacción de los habitantes con esta estructura. Esto incluye cambiar el cerramiento y adecuar las áreas públicas adyacentes para que el pondaje se convierta en un punto

focal y el espacio sea capaz de atraer visitantes. Adicionalmente, no se están considerando las distintas escalas del manejo de la escorrentía (p. ej., control en la fuente y control local), ya que el pondaje almacena la totalidad de escorrentía producida en el área. Por lo que un esquema multifuncional para el manejo de la escorrentía debe incluir la instalación de medidas en las que el agua pluvial sea tratada en el punto donde se produce y en el que se involucren trenes de SUDS, es decir varias tipologías en serie para el tratamiento de la escorrentía. Esta aproximación permitiría que los habitantes interactuaran de distintas maneras con el agua. A su vez, aumentaría la conectividad de áreas verdes, y corredores verdes y verde azules en la ciudadela.

- **Confiabilidad del sistema de drenaje**

Para el cálculo de este indicador, la información de sobrecarga de las estructuras de drenaje (i.e., tuberías) se cuantificó mediante una modelación hidráulica del sistema en SWMM. En primer lugar, se utilizó una lluvia de diseño con un periodo de retorno de 5 años y una duración de 6 horas (Ver Figura 14a) [18]. Esta se calculó mediante la curva IDF de la estación “Bosa-Barreno". Adicionalmente, se usó la información de precipitación del año 2019 de la estación “Kennedy” (Ver Figura 14b). Este año corresponde al más húmedo comprendido entre el 2010 y el 2019.

Como resultado, se obtuvo una confiabilidad de 99.62 % para el sistema de drenaje al considerar el evento con un periodo de retorno de 5 años y una duración de 6 horas. Del total de tuberías que componen la red, el 16% presentaron fallas por sobrecarga. Así mismo, se obtuvo un valor del indicador 99.67% al considerar el periodo extendido. En este caso, el 81% presentaron fallas por sobrecarga. Considerando el hecho de que las redes de drenaje convencional, en general, se diseñan para eventos de lluvia con periodos de retorno entre 2 y 5 años, se observa que el sistema de drenaje de Ciudad Verde posee una alta confiabilidad para las condiciones típicas de operación. Adicionalmente, se obtuvo un valor satisfactorio de confiabilidad al analizar las condiciones de precipitación para periodo extendido. A pesar de que el porcentaje de tuberías que se sobrecargan en este escenario es alto, en promedio las tuberías fallan el 0.34% de su tiempo total de operación.



(a) (b)

Figura 14. Evento de precipitación (a) con un periodo de retorno de 5 años y una duración de 6 horas y (b) para un periodo extendido (2019)

Entre las estrategias que se pueden implementar para aumentar su confiabilidad en el futuro con el fin de evitar afectaciones por cambios en los eventos de precipitación están (1) el mantenimiento preventivo de la red, (2) el control en tiempo real de sistemas de almacenamiento y (3) la implementación de SUDS en zonas aguas arriba de áreas donde se presenten encharcamientos o inundaciones.

- **Resultados de la evaluación comprensiva difusa**

Tal como se explicó para el sector de ecología urbana, una vez obtenida la estimación de cada uno de los indicadores propuestos para este sector, se procedió a realizar la evaluación difusa de los mismos. La Figura 15 presenta el resultado de evaluación de los 14 indicadores considerados por el sector Manejo integrado del agua, los cuales en su totalidad fueron definidos de tipo cuantitativo. De la figura se puede analizar que los indicadores "Asequibilidad al servicio de agua potable y alcantarillado", "Cumplimiento de la calidad requerida de agua" y "Confiabilidad del sistema de drenaje" tienen asociadas en su evaluación dos valoraciones lingüísticas indicando que dichos indicadores presentan cualidades asociadas a ambas etiquetas lingüísticas con diferente grado de pertenencia. Por ejemplo, el indicador "Asequibilidad al servicio de agua potable y alcantarillado" tiene una evaluación de "Regular", dado su mayor grado de pertenencia a esa etiqueta lingüística, con una tendencia a "Malo". Finalmente, se puede observar que los indicadores restantes fueron evaluados con un 100% de pertenencia a las diferentes etiquetas lingüísticas utilizadas para la evaluación. Por ejemplo, los indicadores "Razón entre el porcentaje de escorrentía descargada antes y después de la urbanización", "Agua residual tratada al nivel de calidad requerido", "Conciencia pública" y "Uso multifuncional de la infraestructura verde para el manejo del agua pluvial" pertenecen en un 100% a la etiqueta "Muy Malo", mientras que los indicadores "Cobertura del servicio de alcantarillado sanitario" y "Cobertura del servicio de alcantarillado pluvial" pertenecen en un 100% a la etiqueta "Muy Bueno".

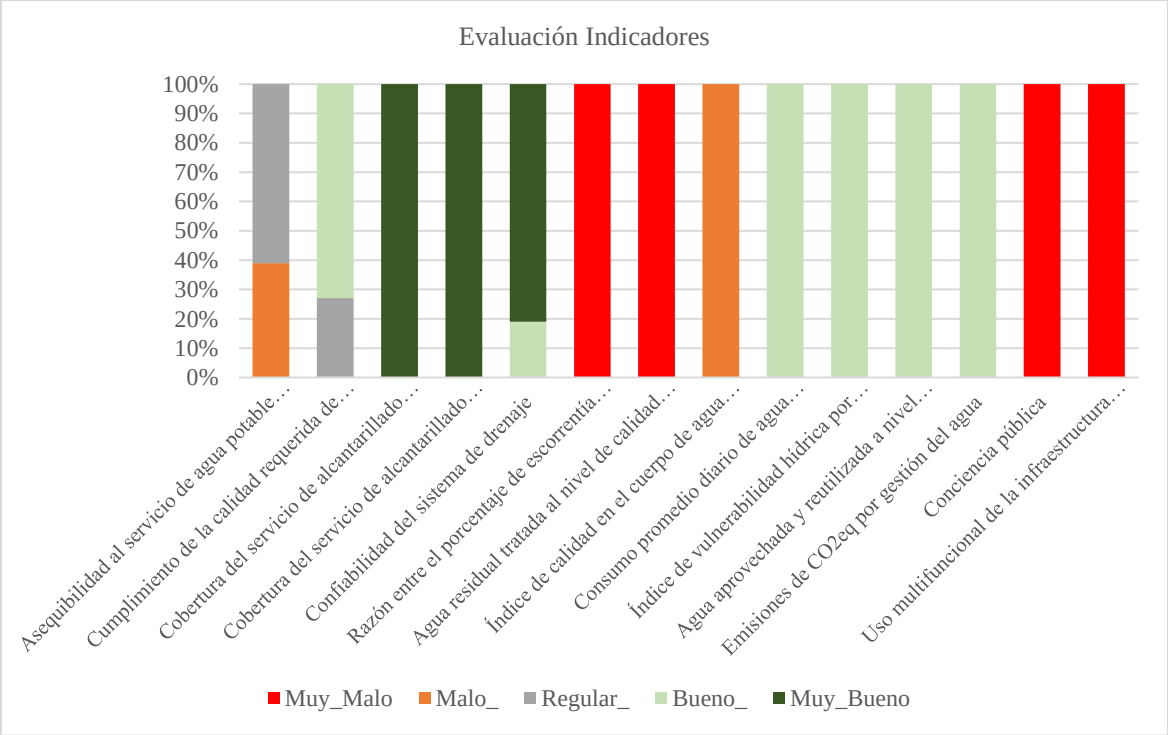


Figura 15. Evaluación de indicadores sector manejo integrado del agua

La Tabla 12 presenta la evaluación final y los grados de pertenencia asociados a cada uno de los indicadores basado en los resultados descritos anteriormente. Es así como este sector tiene 3 indicadores evaluados como "Muy Bueno", 5 indicadores evaluado en "Bueno", un indicador evaluado como "Regular", un indicador evaluado como "Malo" y finalmente, 4 indicadores evaluados como "Muy Malo".

Tabla 12. Evaluación final de indicadores sector manejo integrado del agua: grado de pertenencia y etiqueta lingüística

Indicador	Grado de pertenencia	Etiqueta lingüística de evaluación
Asequibilidad al servicio de agua potable y alcantarillado	0.610	Regular
Cumplimiento de la calidad requerida de agua	1.000	Bueno
Cobertura del servicio de alcantarillado sanitario	1.000	Muy Bueno
Cobertura del servicio de alcantarillado pluvial	1.000	Muy Bueno
Confiabilidad del sistema de drenaje	0.810	Muy Bueno
Razón entre el porcentaje de escorrentía descargada antes y después de la urbanización (Escorrentía descargada)	1.000	Muy Malo
Agua residual tratada al nivel de calidad requerido	1.000	Muy Malo
Índice de calidad en el cuerpo de agua receptor	1.000	Malo
Consumo promedio diario de agua potable por habitante	1.000	Bueno
Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento	1.000	Bueno
Agua aprovechada y reutilizada a nivel residencial	1.000	Bueno
Emisiones de CO2eq por gestión del agua	1.000	Bueno
Conciencia pública	1.000	Muy Malo
Uso multifuncional de la infraestructura verde para el manejo del agua pluvial	1.000	Muy Malo

Tal como se explicó anteriormente, el siguiente paso corresponde a la evaluación de cada una de las etapas definidas por este ámbito sectorial. En la Tabla 13 se presentan los pesos o ponderaciones para los indicadores acorde con cada una de las 6 etapas definidas por este sector. Adicionalmente, en la misma tabla se pueden ver los indicadores que son considerados para la evaluación según la etapa correspondiente. Por ejemplo, a etapa "Ciudad con alcantarillado sanitario" considera para su proceso de evaluación 3 indicadores con sus respectivos pesos, a saber: "Asequibilidad al servicio de agua potable y alcantarillado", "Cumplimiento de la calidad requerida de agua" y "Cobertura del servicio de alcantarillado sanitario". Tal como se detalló en el capítulo 2, la última etapa de este sector: "Ciudad sensible al agua" tiene asociado los 14 indicadores propuestos ya que este enfoque considera que en los diferentes momentos (etapas) los indicadores se van acumulando para la respectiva evaluación.

Tabla 13. Pesos asignados a los indicadores según la etapa sector manejo integrado del agua

Indicador	Etapas					
	Ciudad con suministro de agua	Ciudad con alcantarillado sanitario	Ciudad con drenaje pluvial	Ciudad con calidad de cuerpos de agua	Ciudad con ciclo de agua	Ciudad sensible al agua
Asequibilidad al servicio de agua potable y alcantarillado	50%	25%	16.67%	7.40%	3.13%	2.19%
Cumplimiento de la calidad requerida de agua	50%	25%	16.67%	7.40%	3.13%	2.19%
Cobertura del servicio de alcantarillado sanitario		50%	16.67%	10.00%	3.13%	2.19%
Cobertura del servicio de alcantarillado pluvial			25.00%	7.40%	3.13%	2.19%
Confiabilidad del sistema de drenaje			25.00%	7.40%	7.81%	10.93%
Razón entre el porcentaje de escorrentía descargada antes y				15.00%	7.81%	8.20%

después de la urbanización						
Agua residual tratada al nivel de calidad requerido				22.70%	7.81%	8.20%
Índice de calidad en el cuerpo de agua receptor				22.70%	7.81%	8.20%
Consumo promedio diario de agua potable por habitante					15.63%	8.20%
Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento					15.63%	10.93%
Agua aprovechada y reutilizada a nivel residencial					15.63%	8.20%
Emisiones de CO2eq por gestión del agua					9.38%	6.56%
Conciencia pública						10.93%
Uso multifuncional de la infraestructura verde para el manejo del agua pluvial						10.93%

Como último paso, se obtiene la evaluación final de cada una de las etapas definidas para este sector en un rango de 0 a 100%. Tal como se detalló en la sección 2.6.1 de este informe, esta evaluación final está determinada por los conjuntos difusos definidos para tal fin. Dichos conjuntos difusos para la evaluación final se construyen utilizando los centroides de las funciones de pertenencia asociados a cada una de las etiquetas lingüísticas establecidas y considerando únicamente los indicadores utilizados para la evaluación de cada etapa. Cada etapa tiene sus propios conjuntos difusos para la evaluación final y, por lo tanto, la evaluación final dependerá del nivel de exigencia que tenga la etapa. La Tabla 14 presenta los resultados de la evaluación final de cada una de las etapas. Como se puede observar de la tabla, la etapa "Ciudad con calidad de cuerpos de agua" es la que presenta menor calificación con un 40.66% correspondiendo a una evaluación lingüística de "Malo" con un grado de pertenencia de 0.914. Cabe resaltar que para las etapas evaluadas se puede analizar la influencia que cada uno de los indicadores tiene sobre la misma. Esto basado en la evaluación difusa y los pesos asociados a dichos indicadores. Por lo anterior, es importante analizar qué medidas se pueden implementar con el fin de mejorar el desempeño de la etapa, por ejemplo, para esta etapa mediante una gestión más eficiente de las aguas residuales y la escorrentía. Por otro lado, la etapa "Ciudad con drenaje pluvial" es la que presenta mayor calificación con un 79.495% correspondiendo a una evaluación de "Regular" con una tendencia a "Bueno", tal como se presenta en la Tabla 14.

Tabla 14. Evaluación final de las etapas sector manejo integrado del agua

Etapa	**Valoración etapa (%)**	**Etiquetas de evaluación**				
		Muy Malo	**Malo**	**Regular**	**Bueno**	**Muy Bueno**
Ciudad con suministro de agua	**64.852**	0.000	0.000	**0.938**	0.062	0.000
Ciudad con alcantarillado sanitario	**77.784**	0.000	0.000	**0.997**	0.003	0.000
Ciudad con drenaje pluvial	**79.495**	0.000	0.000	**0.911**	0.089	0.000
Ciudad con calidad de cuerpos de agua	**40.660**	0.086	**0.914**	0.000	0.000	0.000
Ciudad con ciclo de agua	**49.050**	0.000	**0.543**	0.457	0.000	0.000
Ciudad Sensible al agua	**45.273**	0.000	**0.828**	0.172	0.000	0.000

Como conclusión se puede decir que los indicadores del sector de manejo integrado del agua con mejor desempeño en Ciudad Verde fueron los relacionados con la prestación del servicio de acueducto y alcantarillado. Estos corresponden a la cobertura del servicio de alcantarillado sanitario y pluvial, la calidad del agua potable y la confiabilidad del sistema de drenaje. Sin embargo, en el marco de transición hacia un manejo sostenible del agua, dichos indicadores hacen parte de las primeras etapas y una calificación alta corresponde a un nivel de avance mínimo para el bienestar de los habitantes de un área urbana. De acuerdo con los resultados obtenidos para el indicador de emisiones de CO2-eq, los procesos para el suministro del agua y el manejo de aguas pluviales y residuales no conllevan a emisiones altas en comparación con otros sectores. En consecuencia, en este sector hay un mayor potencial en el desarrollo de medidas orientadas a la adaptación al cambio climático.

En contraste, los indicadores relacionados con la asequibilidad y el consumo de agua potable evidenciaron problemas en la asequibilidad a este servicio (i.e., la asequibilidad al servicio de agua potable y alcantarillado pluvial supera el estándar en un 98%, en el mejor de los casos). Por otro lado, el indicador que compara el porcentaje de la escorrentía descargada antes y después de la urbanización cuantificó un aumento considerable en el volumen de escorrentía generado y descargado al cuerpo de agua receptor. A su vez, el indicador de uso multifuncional de la infraestructura urbana para el manejo de la escorrentía demostró que el uso multifuncional del pondaje es muy bajo. En la actualidad, esta estructura no hace parte del espacio público efectivo y tampoco hay aprovechamiento del agua almacenada. Por lo tanto, cambios en el manejo del pondaje y en las zonas aledañas - para integrarlo al espacio público, promover el uso del agua pluvial para usos no potables y favorecer la recreación pasiva - permitiría aumentar la provisión de servicios ecosistémicos por parte de la estructura (p.ej., oportunidades de educación y cercanía a espacios verdes) y reducir el volumen de escorrentía vertida. El indicador de agua residual tratada al nivel de calidad requerido reflejó una desconexión entre la gestión de esta y la planeación del desarrollo urbano en el área. Por último, los indicadores estimados a nivel de cuenca evidenciaron problemas de cantidad y calidad en Ciudad Verde. Lo anterior debido a que la vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento es muy alta y la calidad del cuerpo de agua receptor se clasifica como mala.

6.1.3. Suministro y uso de energía

Múltiples metodologías alrededor de indicadores para el diagnóstico y evaluación de la sostenibilidad han sido propuestas a lo largo de los años y fueron consultadas con el fin de tener una mejor perspectiva de la visión de ciudades sostenibles que se tiene en el contexto internacional y las respectivas aproximaciones a un esquema de indicadores holístico. La revisión de literatura fue restringido a propuestas de indicadores en un contexto urbano que dentro de los sectores intervenidos se encuentre el sector energía. Es de destacar que la gran mayoría de los esquemas que se han propuesto alrededor del desarrollo sostenible de ciudades tratan de integrar diferentes sectores involucrados en dicho desarrollo, y por lo tanto proponen diferentes esquemas de integración de indicadores con el fin de encontrar ya sea índices sectoriales o un índice único que permita comparar el nivel de sostenibilidad entre ciudades. A su vez se resalta que también fueron consultados esquemas de indicadores que abarcan un contexto más amplio como a nivel país, y en un contexto más restringido como a nivel de edificaciones. Dentro de los esquemas indicadores revisados, se encuentran aquellos que ya han sido establecidos por diferentes clases de organizaciones que van desde entidades gubernamentales, comisiones, iniciativas en sostenibilidad, entre otros.

Partiendo de la revisión del contexto nacional e internacional, se concreta la propuesta de indicadores la cual se detalla a continuación. Estos indicadores en principio serán de diagnóstico, los cuales permitirán trazar una línea base del macroproyecto de vivienda a evaluar. Una vez se

consideren medidas de mitigación sobre estos macroproyectos, se evaluará el impacto de dichas medidas a través de indicadores de desempeño, los cuales corresponden a la evaluación de los cambios en los indicadores respecto al caso base a lo largo del tiempo.

- **Accesibilidad al servicio de electricidad y gas natural**

El cálculo de este indicador se hizo basado en la suposición de que macroproyectos de vivienda recientes como lo son Ciudad Verde garantizan el acceso a este tipo de servicios energéticos básicos que son claves para garantizar el desarrollo de las actividades básicas de cada hogar y de esta manera garantizar un adecuado nivel de calidad de vida. Si bien a nivel de electricidad esta suposición es acertada, no necesariamente será el caso para gas natural. Puede existir hogares que opten por usar gas licuado de petróleo (GLP) para actividades de cocción. Sin embargo, por la naturaleza de macroproyecto de vivienda de Ciudad Verde, se considera que esta suposición es aplicable para gas natural también dado que son servicios esenciales que deben garantizarse al construir un proyecto del calibre de Ciudad Verde.

Por lo tanto, se considera que la totalidad de los hogares cuentan con el acceso del servicio de electricidad y gas natural, resultando en una evaluación del 100% para dichos indicadores.

- **Asequibilidad del servicio de electricidad y gas natural**

La estimación de este indicador parte de dos fuentes de información principales. La primera consiste en la encuesta realizada a los habitantes de Ciudad Verde a partir de la cual se extrajo información acerca del pago mensual de los servicios de electricidad y gas. La segunda corresponde a la encuesta multipropósito de 2017 realizada por el DANE con respecto al ingreso por hogar para los estratos 1 y 3 reportados durante el año 2018. Para el caso de particular de Ciudad Verde se tiene en cuenta que el 2% de los hogares corresponden a estrato 1, mientras que el 98% restante corresponde a estrato 3. Considerando lo anterior, en la Tabla 15. Pago promedio de servicios energéticos esenciales se presentan los valores promedio de pago de electricidad y gas considerados para Ciudad Verde a partir de los resultados de la encuentra

Tabla 15. Pago promedio de servicios energéticos esenciales

Pago de electricidad ($COP/mes)	$43.657
Pago de gas natural ($COP/mes)	$28.406

En un principio, la estimación del indicador se realiza considerando el *ingreso libre*[3] de un hogar, en vez de considerar el ingreso completo de cada hogar. A partir de la consideración del *ingreso libre*, se consideran dos escenarios en los cuales que consideran el pago del arriendo o leasing dentro del cálculo de los ingresos libres. Al considerar el pago de arriendo o leasing, los valores de los indicadores corresponden a -62.18% para gas natural y -133.57% para electricidad. A partir de lo anterior, se encuentra que los hogares en Ciudad Verde cuentan con una capacidad insuficiente para el pago de los servicios tanto de electricidad como gas si dentro de sus ingresos disponibles se descuenta el pago del arriendo. Ahora bien, si no se considera el valor del arriendo, se tiene un valor de asequibilidad del 13.56% para gas natural y 19.66% los cuales reflejan que existe un compromiso del pago de los servicios esenciales sobre los ingresos libres de los hogares. Si bien

[3] El ingreso libre por hogar se calcula como el ingreso resultante después del pago de gastos básicos, dentro de los que se consideró el gasto por arriendo, electricidad, gas, telefonía, alimentos y bebidas no alcohólicas, vestuario, salud, transporte, educación y acueducto y alcantarillado. Los datos del gasto en energía eléctrica, gas y transporte fueron obtenidos de la encuesta realizada en Ciudad Verde y la tarifa pagada por hogar de gas y electricidad fueron obtenidos de las respectivas empresas de suministro (Gas Natural Vanti, CODENSA)

estos últimos valores se consideran conllevan a una buena asequibilidad, los habitantes de Ciudad Verde en las entrevistas con los grupos focales presentaron un descontento con respecto al cobro del servicio de electricidad debido a que el cobro de este servicio incluye el cobro de un impuesto por alumbrado público. Soacha es un municipio que de manera particular realiza este cobro subcontratando a CODENSA para este fin, por lo que se considera que es necesario que exista claridad del propósito del cobro de este servicio y claridad acerca de cómo se está facturando, dado estas entrevistas se expresó que este cobro constituía un porcentaje importante del cobro del servicio. A su vez una reducción del cobro de este impuesto puede significar una mejora considerable en la asequibilidad del servicio de electricidad.

- **Emisiones de $CO2_{eq}$ por consumo de energía por hogar**

La estimación de este indicador se realizó a partir de la línea base de emisiones de consumo de electricidad y gas desarrollada para consumo energético en edificios residenciales, agregando las emisiones asociadas a estos dos recursos energéticos, teniendo en cuenta que en Ciudad Verde estas son los principales recursos de energía eléctrica y térmica. Teniendo en cuenta lo anterior, se encuentra que las emisiones de $CO2_{eq}$ por hogar al año es de 0.72 $tCO2_{eq}$ la cual fue valorada como emisiones normales. Si bien se considera que son emisiones en un rango normal, existe un potencial de mejora de importante que se puede lograr a través de estrategias de eficiencia energética, gestión de demanda y de generación distribuida de energía a través de recursos de energía renovables.

- **Frecuencia y duración de interrupciones del servicio de electricidad**

La estimación de este par de indicadores partió del Informe de Sostenibilidad de 2018 de Enel-Codensa, el cual reporta el estado de estos indicadores para éste como operador de red y que se muestra en la Tabla 16. Sin embargo, es de resaltar que este indicador aplica para todos los usuarios de CODENSA, que cubre el departamento de Cundinamarca, y municipios de Boyacá, Tolima y Meta, lo cual puede no ser equivalente a Ciudad Verde debido a que se trata de una zona netamente urbana.

Tabla 16. Indicadores de calidad del servicio reportados por CODENSA

SAIDI (Minutos/hogar)	710
SAIFI (# interrupciones)	9

Para tener una mejor visión del estado de la calidad de energía en Ciudad Verde, dentro de la encuesta aplicada a sus habitantes se consideraron preguntas asociadas a la calidad del servicio percibida por los usuarios. En la Figura 17 se presentan los resultados sobre el número de interrupciones percibidas a la semana por parte de cada uno de los encuestados. En esta se observa que alrededor un poco más del 65% de los habitantes no presentan interrupciones en el servicio, mientras que un pequeño porcentaje de los encuestados presentan interrupciones cada uno, dos y tres días. Por lo tanto, en materia del número de interrupciones de considera que Ciudad Verde cuenta con una buena calidad del servicio, con oportunidad de mejora en aquellos hogares donde aún se presentan interrupciones de uno, dos o tres días a la semana

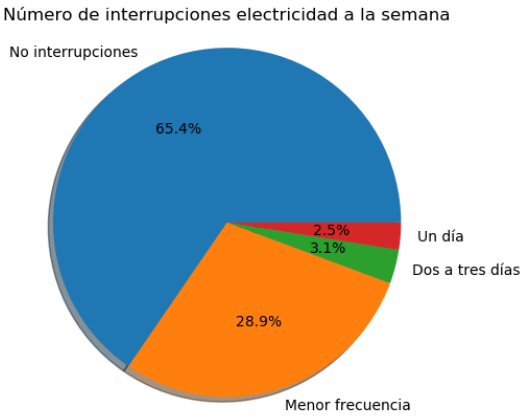


Figura 16. Resultados a la pregunta: en una semana normal, ¿con qué frecuencia tiene interrupciones del servicio de energía eléctrica?

En la Figura 17 se presenta un histograma de la duración de las interrupciones percibida por aquellos encuestados que reportaron tener interrupciones en el servicio. El promedio calculado de tiempo de interrupción de acuerdo con lo reportado es de alrededor de 19.71 minutos por cada hogar. Este promedio de duración de interrupciones refleja una buena calidad del servicio; sin embargo, no se puede dejar de lado la existencia de usuarios que reportan tiempos de interrupción superior a 60 minutos, que comprenden el 5.6% de los encuestados. Por lo tanto, si bien en promedio la duración de interrupciones refleja una buena calidad de servicio, existe una ventana de mejora para por parte de CODENSA para reducir este tipo de casos.

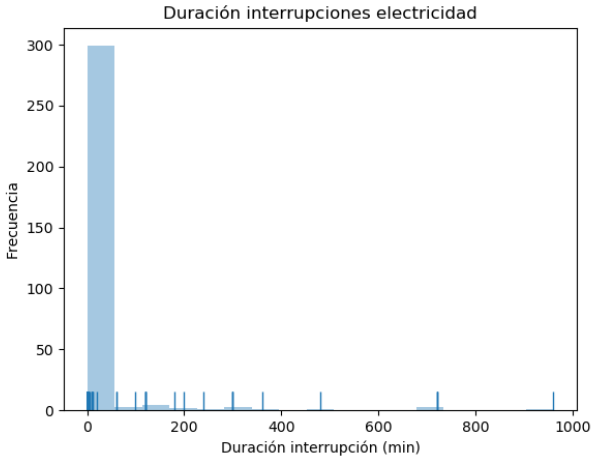


Figura 17. Respuesta a la pregunta: indique en promedio de cuánto son estas interrupciones. Pregunta abierta, respuesta dada en minutos.

- **Accesibilidad a medición inteligente**

La estimación de este indicador se realizó bajo la suposición de que Ciudad Verde no cuenta hasta el momento con instalaciones de medición inteligente. Si bien CODENSA ha reportado la instalación de alrededor de 80 mil medidores para sus usuarios, no es claro en que ciudades del país estas instalaciones fueron llevadas a cabo ni qué tipo de usuarios fueron escogidos para este fin. Si bien en la encuesta a Ciudad Verde se realizaron preguntas alrededor de la medición inteligente, no se realizó la pregunta explicita de si el encuestado tenía o no un medidor inteligente. ´Por los

anteriores argumentos, se hizo una estimación de 0% para este indicador, lo que refleja que existe un potencial importante en la inclusión del usuario como un actor fundamental en el mercado eléctrico y un potencial importante en la caracterización de los patrones de consumo de los usuarios. En Colombia en la actualidad se está desarrollando un proyecto de resolución alrededor de la medición inteligente y su despliegue, por lo que se esperaría que en próximos años la accesibilidad a medición inteligente en Ciudad Verde crezca.

- **Grado de adopción de medición inteligente por parte de usuarios**

Este indicador pretende reflejar la influencia que ha tenido la medición inteligente sobre los patrones de comportamiento de los usuarios y si efectivamente hacen uso de la información provista por parte de estos dispositivos en sus decisiones de consumo de electricidad. Por lo tanto, parte del hecho de que existan medidores inteligentes instalados en estos hogares. Por lo tanto, considerando que se evalúo una accesibilidad de 0% para Ciudad Verde, entonces se estima que este indicador presenta una evaluación media o neutral.

En la encuesta se realizó un apartado relacionado con medición inteligente, en la cual se busca conocer si los habitantes de Ciudad Verde conocían acerca de este tipo de tecnología y saber su percepción acerca de los posibles beneficios que esta trae consigo. En la Figura 18 se muestra el resultado sobre el conocimiento medidores prepago e inteligentes en donde se puede concluir que esta es una tecnología que aún requiere de divulgación en la población como parte del proceso de capacitación de sus habitantes para la adopción de esta tecnología

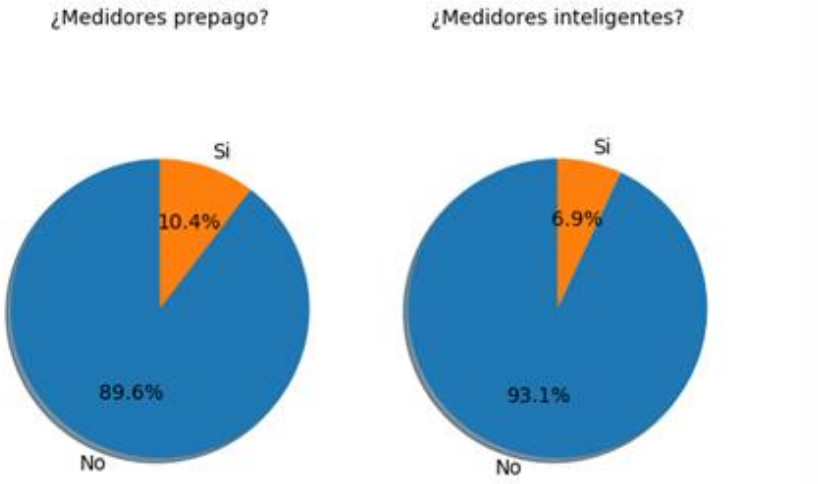


Figura 18. Resultados a la pregunta: izquierda: ¿Ha escuchado acerca de los medidores prepago o medidores recargables de electricidad? Derecha: ¿Ha escuchado acerca de los medidores inteligentes de electricidad?

En la Figura 19 se muestran los resultados de los beneficios que fueron expuestos a los encuestados, en donde se muestra que hay una respuesta mayormente favorable acerca de los potenciales beneficios que estos pueden traer y que pueden aumentar la adopción y el sostenimiento en el tiempo de este tipo de tecnologías. Es de destacar que para lograr una adopción apropiada de este tipo de tecnologías es necesario realizar una divulgación, capacitación del usuario acerca de los potenciales beneficios que estas tecnologías pueden traer para ellos, así como divulgar los beneficios que traerán para los operadores de red y ser claros sobre cómo se va a tratar la información que recojan de dichos medidores. Como parte de este proceso también se requiere un proceso de seguimiento sobre si la adopción ha sido efectiva, el cual es un objetivo que busca incentivar este indicador.

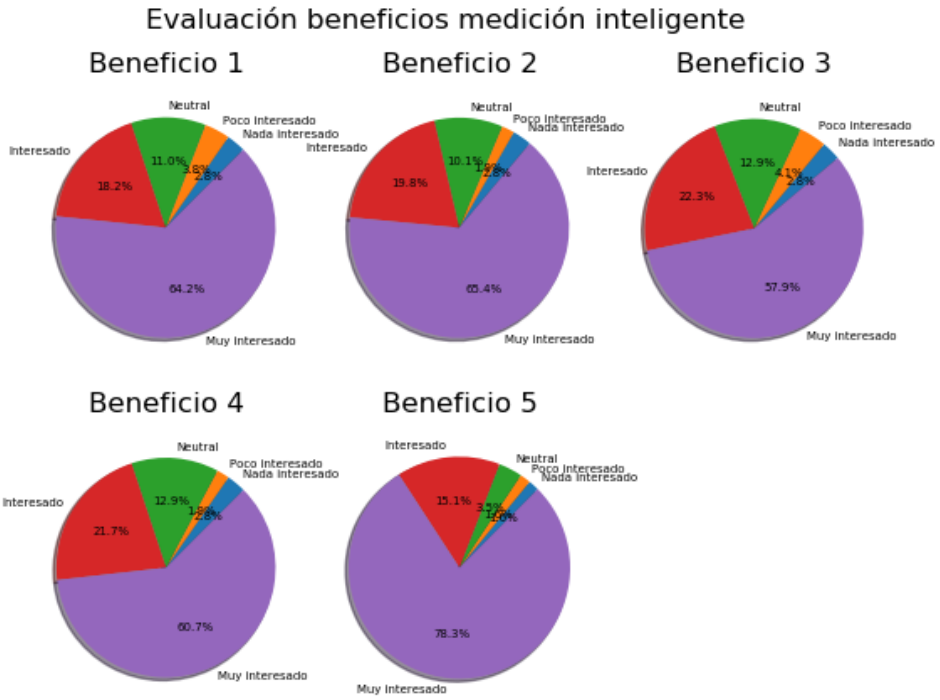


Figura 19. Evaluación de beneficios de medición inteligente.
Beneficio 1: Visualizar el consumo de energía histórico y actual desde cualquier dispositivo.
Beneficio 2: Visualizar el costo por consumo de electricidad en lo que lleva del mes y la proyección a fin de mes basado en consumo histórico.
Beneficio 3: Promover programas y campañas de autogestión de consumo de energía. Por ejemplo, establecer una meta mensual de consumo y monitorear su progreso en tiempo real.
Beneficio 4: Proponer soluciones que permitan mejorar la calidad del servicio por parte de la empresa prestadora del servicio a partir de la información adquirida de los usuarios.
Beneficio 5: Monitorear el consumo de electrodomésticos del hogar, tal que sepa la magnitud de impacto de estos en su consumo y pueda tomar decisiones sobre su uso.

- **Políticas locales orientadas a programas de eficiencia energética y gestión de la demanda**

Este indicador pretende por un lado diagnosticar la existencia de políticas de gobiernos locales de ciudades orientadas a eficiencia energética y gestión de la demanda y por otro lado valorar de manera cualitativa el impacto que estas hayan generado sobre los ciudadanos y sobre el comercio alrededor de sus patrones de consumo de energía de tal manera que se concluya el cumplimiento de los objetivos propuestos por dichas políticas. Si bien se realizó una valorización de este indicador como Muy malo dado que no se encontró política alguna que promoviera los temas en cuestión, desde la herramienta en las etapas correspondientes el peso asignado fue de cero gracias a que este indicador está orientado a ciudades que cuenta con organismos políticos tales como Alcaldías desde las cuales se expidan este tipo de políticas, campañas o iniciativas. A su vez desde la Alcaldía de Soacha no se encontró iniciativa alguna orientada a la mejora de eficiencia energética o gestión de la demanda.

- **Autosuficiencia de energía eléctrica y térmica a través de recursos de energía distribuidos**

La estimación de este indicador se hizo bajo la suposición de que Ciudad Verde aún no cuenta con algún sistema de generación distribuida de energía ya sea eléctrica o térmica. Esta suposición fue comprobada a través de entrevistas con los ciudadanos y con la constructora gestora del proyecto Amarilo. A su vez, se comprobó este supuesto a partir de un recorrido hecho a la Ciudadela para

caracterizar el alumbrado público y las fotos aéreas provistas por la constructora Amarilo (agosto de 2019). Por lo tanto, Ciudad Verde cuenta con una autosuficiencia del 0% tanto para energía eléctrica como para energía térmica. Si bien a la luz la noción de ciudades sostenibles se considera que los DERs cumplen un rol importante y se consideran fundamentales, se considera que su implementación en Ciudad Verde no es una de las problemáticas más importantes. Entonces, se considera que el bajo valor de este indicador no es crítico; sin embargo, si es importante promover el planteamiento de proyectos de energía renovable tanto en zonas residencial como no residenciales.

Lo anterior se contrasta en las entrevistas a los grupos focales, donde se resaltaron dentro de los problemas de la Ciudadela la falta plantas de respaldo, destacando tecnologías renovables como la energía solar como una oportunidad para la Ciudadela, lo que conlleva a una dependencia de la red en caso de fallas. Por otro lado, en la encuesta se realizaron preguntas alrededor de la implementación de tecnologías de generación de energía eléctrica como sistemas de paneles fotovoltaicos y de generación de energía térmica como sistemas de colectores solares, buscando evaluar principalmente percepción y disposición de contribuir económicamente con su implementación. Como se verá más adelante en la sección 6.3.3, los encuestados manifiestan una percepción en su mayoría positiva con respecto a la implementación de estas tecnologías y existe una disposición de contribuir monetariamente a su implementación.

- **Porcentaje de sistemas de gestión de energía inteligente en prosumidores**

La estimación de este indicador parte del supuesto de que existen sistemas de recursos de energía distribuidos en edificios residenciales y comerciales, cuyo recurso es gestionado a través de un sistema inteligente. Considerando que anteriormente se estimó que Ciudad Verde cuenta con una autosuficiencia de 0%, no existen sistemas de recursos de energía distribuidos con los que se puedan comprobar que cuenten con sistemas de gestión de energía inteligente. Por lo tanto, la estimación de este indicador es de 0%.

Es de destacar que la implementación de sistemas de recursos de energía distribuidos para autogeneración de energía, como se expresó anteriormente, no es una problemática prioritaria en Ciudad Verde. Sin embargo, es necesario empezar a una discusión acerca de la factibilidad de la implementación de estos sistemas, dentro de la cual se debe incluir la necesidad de que cada uno de estos sistemas cuenten con un sistema inteligente de gestión de energía de tal manera que este opere de manera eficiente y permita la interoperabilidad entre sistemas de energía y entre sistemas correspondientes a otros sectores distintos al sector energía.

- **Interconectividad de sistemas de energía**

La estimación de este indicador parte del supuesto de que existen sistemas de recursos de energía distribuidos en edificios residenciales, comerciales, cuyo recurso es gestionado a través de sistemas de gestión de energía. Considerando los resultados de los indicadores relacionados a autosuficiencia energética y porcentaje de sistema de gestión de energía, entonces se considera que la interconectividad, fuera de la que ya existe en el sistema de distribución, es muy baja. Similar a los indicadores mencionados, se considera que las tecnologías asociadas a la interconectividad, en especial la capa de telecomunicaciones que se requiere para mejorarla no son un tema que tendrá relevancia para Ciudad Verde ni que tampoco solucionará las problemáticas existentes. Sin embargo, con el fin de lograr una operación eficiente de los potenciales sistemas de energía que se consideren en un futuro para este macroproyecto, es importante tener como un tópico de discusión la interconectividad de los sistemas de gestión de energía asociados.

- **Interoperabilidad**

La estimación de este indicador parte del supuesto de que existen sistemas de recursos de energía distribuidos desplegados a lo largo del caso de estudio, cuyo recurso es gestionado a través de sistemas de gestión de energía. Este indicador pretende evaluar el nivel de interacción que existe entre estos sistemas de generación de energía y otros sistemas ajenos al sector de energía tales como, por ejemplo, un sistema de tratamiento de agua, un sistema de transporte público interno en la ciudadela, o el transporte de residuos a las plantas de tratamiento. Considerando que no se disponen de sistemas de energía fuera a la red de distribución existente y por lo tanto no hay manera de evaluar algún tipo de sinergia entre estos sistemas y otros sistemas sectoriales. Sin embargo, como indicadores anteriores, este indicador no es de alta importancia en Ciudad Verde dado que no resuelve los problemas a los que se ve enfrentado actualmente. Sin embargo, es importante que se considere dentro de la discusión de cómo Ciudad Verde puede ser más sostenible.

- **Resultados de la evaluación comprensiva difusa**

Una vez obtenida la estimación de cada uno de los indicadores propuestos para el sector suministro y uso de energía, se procedió a realizar la evaluación difusa de los mismos. La Figura 20 presenta el resultado de evaluación de los 15 indicadores considerados por este sector. De los 15 indicadores propuestos, 11 se definieron de tipo cuantitativo y 4 de tipo cualitativo.

De la Figura 20 se puede analizar que la totalidad de los indicadores, dada la definición de las funciones de pertenencia, fueron evaluados con un 100% de pertenencia a las diferentes etiquetas lingüísticas utilizadas para la evaluación. Por ejemplo, los indicadores “Accesibilidad al servicio de electricidad” y “Accesibilidad al servicio de gas natural/GLP” pertenecen en un 100% a la etiqueta “Muy Bueno”, mientras que los indicadores “Frecuencia promedio de interrupciones en el servicio de electricidad” y “Duración promedio de interrupciones en el servicio de electricidad” pertenecen en un 100% a la etiqueta “Bueno”.

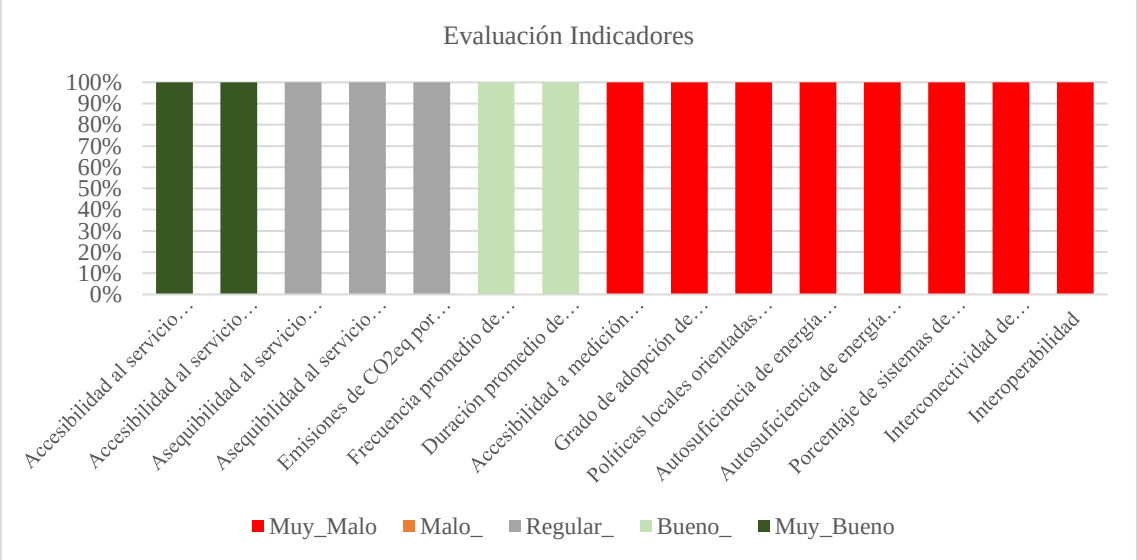


Figura 20. Evaluación de indicadores sector energía

La Tabla 17 presenta la evaluación final y los grados de pertenencia asociados a cada uno de los indicadores. Es así como este sector tiene 2 indicadores evaluados como “Muy Bueno”, 2 indicadores evaluado en “Bueno”, 3 indicadores evaluados como “Regular” y finalmente, 8 indicadores evaluados como “Muy Malo”.

Tabla 17. Evaluación final de indicadores sector energía: grado de pertenencia y etiqueta lingüística

Indicador	Grado de pertenencia	Etiqueta lingüística de evaluación
Accesibilidad al servicio de electricidad	1.000	Muy Bueno
Accesibilidad al servicio de gas natural	1.000	Muy Bueno
Asequibilidad al servicio de electricidad	1.000	Regular
Asequibilidad al servicio de gas natural	1.000	Regular
Emisiones de CO_{2eq} por consumo de energía	1.000	Regular
Frecuencia promedio de interrupciones en el servicio de electricidad	1.000	Bueno
Duración promedio de interrupciones en el servicio de electricidad	1.000	Bueno
Accesibilidad a medición inteligente	1.000	Muy Malo
Grado de adopción de medición inteligente por parte de usuarios	1.000	Muy Malo
Políticas locales orientadas a programas de eficiencia energética y gestión de la demanda	1.000	Muy Malo
Autosuficiencia de energía eléctrica a través de recursos de energía distribuidos	1.000	Muy Malo
Autosuficiencia de energía térmica a través de recursos de energía distribuidos	1.000	Muy Malo
Porcentaje de sistemas de gestión de energía inteligente en prosumidores	1.000	Muy Malo
Interconectividad de sistemas de energía	1.000	Muy Malo
Interoperabilidad	1.000	Muy Malo

En la Tabla 18 se presentan los pesos o ponderaciones para cada uno de los indicadores acorde con las 5 etapas definidas por este sector. Adicionalmente, en la misma tabla se pueden ver los indicadores que son considerados para la evaluación según la etapa correspondiente. Por ejemplo, la etapa "Ciudad con suministro de electricidad y gas por red" considera para su proceso de evaluación 5 indicadores con sus respectivos pesos, a saber: "Accesibilidad al servicio de electricidad", "Accesibilidad al servicio de gas natural", "Asequibilidad al servicio de electricidad", "Asequibilidad al servicio de gas natural" y "Emisiones de CO2eq por consumo de energía". Como se puede observar de la tabla, al indicador "Políticas locales orientadas a programas de eficiencia energética y gestión de la demanda" se le asignó una ponderación igual a cero, lo cual quiere decir que este indicador no es considerado en el proceso de evaluación para este caso de estudio en particular. Sin embargo, queda abierta la posibilidad de usar dicho indicador para otros casos de estudio donde pueda estimarse, por ejemplo, basado en las políticas establecidas por los gobiernos locales.

Tabla 18. Pesos asignados a los indicadores según la etapa sector energía

Indicador	Etapas				
	Ciudad con suministro de electricidad y gas por red	Ciudad con suministro de energía confiable y de calidad	Ciudad con demanda participativa (gestión de la demanda)	Ciudad con prosumidores y comunidades energéticas	Ciudad con DERs y distritos energéticos
Accesibilidad al servicio de electricidad	15.0%	10.0%	2.5%	1.0%	1.5%
Accesibilidad al servicio de gas natural	15.0%	10.0%	2.5%	1.0%	1.5%
Asequibilidad al servicio de electricidad	25.0%	12.5%	10.0%	6.5%	5.0%
Asequibilidad al servicio de gas natural	25.0%	12.5%	10.0%	15.0%	5.0%
Emisiones de CO_{2eq} por consumo de energía	20.0%	10.0%	10.0%	5.0%	12.5%
Frecuencia promedio de interrupciones en el servicio de electricidad		22.5%	10.0%	5.0%	5.0%
Duración promedio de interrupciones en el servicio		22.5%	10.0%	5.0%	5.0%

de electricidad					
Accesibilidad a medición inteligente			25.0%	5.0%	5.0%
Grado de adopción de medición inteligente por parte de usuarios			20.0%	5.0%	5.0%
Políticas locales orientadas a programas de eficiencia energética y gestión de la demanda			0.0%	0.0%	0.0%
Autosuficiencia de energía eléctrica a través de recursos de energía distribuidos				25.0%	12.75%
Autosuficiencia de energía térmica a través de recursos de energía distribuidos				25.0%	12.75%
Porcentaje de sistemas de gestión de energía inteligente en prosumidores					12.75%
Interconectividad de sistemas de energía					12.75%
Interoperabilidad					3.50%

La evaluación final de cada una de las etapas definidas para este sector se da en un rango de 0 a 100% y los resultados son presentados en la Tabla 19. Se puede observar que la etapa "Ciudad con suministro de electricidad y gas por red" presenta el mejor desempeño con una valoración de 73.098% correspondiendo a una evaluación lingüística de "Bueno" con un grado de pertenencia de 0.591, adicionalmente, se puede analizar que dicha etapa tiene una tendencia a la etiqueta lingüística "Muy Bueno" con un grado de pertenencia 0.409. Este resultado, se atribuye a que, de los 5 indicadores asociados a dicha etapa, 2 son evaluados como "Muy Bueno" y los 3 restantes son evaluados como "Regular".

Por otro lado, las etapas "Ciudad con prosumidores y comunidades energéticas" y "Ciudad con DERs y distritos energéticos" son las etapas que presenta el peor desempeño con un 27.394% y 28.404% respectivamente, correspondiendo a una evaluación lingüística "Muy Malo" con un 100% de pertenencia a esta etiqueta lingüística para las dos etapas. Los resultados de estas dos etapas se pueden entender debido a que, por ejemplo, para la etapa "Ciudad con DERs y distritos energéticos" los 8 indicadores del sector evaluados como "Muy Malo" hacen parte del proceso de evaluación de esta etapa. Por lo anterior, con el objetivo de mejorar el desempeño de dichas etapas es necesario establecer estrategias de mejora para los indicadores asociados.

Tabla 19. Evaluación final de las etapas sector energía

Etapa	**Valoración etapa (%)**	**Etiquetas de evaluación**				
		Muy Malo	**Malo**	**Regular**	**Bueno**	**Muy Bueno**
Ciudad con suministro de electricidad y gas por red	**73.098**	0.000	0.000	0.000	**0.591**	0.409
Ciudad con suministro de energía confiable y de calidad	**69.615**	0,000	0.000	0.000	**0.615**	0.385
Ciudad con demanda participativa (gestión de la demanda)	**35.447**	**0.945**	0,055	0.000	0.000	0.000
Ciudad con prosumidores y comunidades energéticas	**27.394**	**1.000**	0.000	0.000	0.000	0.000
Ciudad con DERs y distritos energéticos	**28.404**	**1.000**	0.000	0.000	0.000	0.000

Como conclusiones generales del proceso de evaluación, se puede decir que Ciudad Verde desde el enfoque de ciudad sensible a la energía se considera como una ciudadela donde se garantiza el suministro confiable y de calidad de los servicios energéticos a sus ciudadanos. Adicionalmente, garantiza el acceso a los servicios energéticos básicos a sus ciudadanos comprendidos por el servicio de electricidad y gas natural. El servicio de electricidad es suministrado con calidad de servicio buena tanto desde el punto de vista del reporte de calidad de su proveedor como lo reportado por los mismos usuarios. No obstante, no se desconoce que existe un potencial de mejora importante para garantizar el suministro del servicio con el mínimo de interrupciones y duración de interrupciones posible. En materia de asequibilidad a los servicios, se considera que en Ciudad Verde los servicios energéticos tienen una buena asequibilidad; sin embargo, para el servicio de electricidad, existe un potencial de mejora al considerar que el servicio de alumbrado público hace parte del cobro del servicio, lo cual ha sido destacado por la población como una problemática. Considerando lo anterior, Ciudad Verde presenta un buen desempeño en cuanto al acceso, calidad y asequibilidad del servicio se trata. Sin embargo, es importante destacar que la visión de una ciudad sensible a la energía es una ciudad o macroproyecto con suministro limpio, confiable y eficiente, donde se ha pasado por diferentes etapas que consideran tecnologías de monitoreo de demanda como lo son los medidores inteligentes, prosumidores que suplen su demanda a través de recursos de energía distribuidos limpios, y cuenta con una infraestructura de comunicaciones a través de la cual la gestión eficiente de la energía y la interoperabilidad con otros sectores es posible. En el contexto colombiano estas tecnologías son emergentes y su nivel de despliegue a nivel urbano se encuentra en sus primeros pasos, por lo cual si bien no es relevante en el contexto de hoy no considerar estas tecnologías, en los próximos años Ciudad Verde puede considerar a través de una alianza entre diferentes agentes como son los usuarios, las empresas suministradoras de los servicios, gobierno local y nacional, entre otros, la implementación gradual de estas tecnologías para lograr un suministro de los servicios energéticos confiable asequible, inteligente, eficiente para los usuarios y con el mínimo de emisiones de gases de efecto invernadero.

6.1.4. Gestión de residuos

En la tabla a continuación se presenta la cuantificación de los indicadores propuestos para la evaluación de la gestión integral de residuos generados en el macroproyecto de vivienda Ciudad Verde (CV) y la comparación de los resultados con categorías establecidas de acuerdo con valores de referencia (ver anexo). Es importante mencionar que los indicadores evaluados son específicos para la medición de las condiciones del proyecto CV, teniendo en cuenta el tipo de residuos generados en un proyecto mayoritariamente residencial y con características de construcción planeada y a gran escala.

Tabla 20. Evaluación de indicadores de la gestión de residuos en Ciudad Verde y comparación con marcos de referencia

Indicador	Descripción	Resultado Ciudad Verde 2018	Comparación Valores de Referencia	Comentarios
Asequibilidad del servicio de aseo	Fracción de los ingresos del hogar destinada al pago de servicio de aseo.	0.95 %	**Bueno**	El valor del indicador se calculó ponderando los cobros de aseo, subsidios e ingresos para los hogares de estratos 1 y 3 presentes en CV.
Nivel de cumplimiento de los derechos laborales	Cuantifica el cumplimiento de los derechos laborales, representado en la afiliación a Aseguradora de Riesgos Laborales (ARL), como una medida de las condiciones mínimas que garantizan el bienestar de los trabajadores	18.3 %	**Muy malo**	Este indicador se calculó teniendo en cuenta los trabajadores de la empresa de aseo encargada de la recolección, barrido, poda y corte de césped; los empleados del relleno sanitario; y la población recicladora de oficio que labora en el municipio en el que se ubica

	en todas las etapas de la gestión de residuos.			Ciudad Verde.
Cobertura de recolección domiciliaria de residuos sólidos	Porcentaje de hogares con servicio de recolección de residuos sólidos domiciliarios.	100%	**Muy bueno**	-
Porcentaje de residuos dispuestos adecuadamente	Porcentaje de residuos de todos los tipos con disposición final adecuada con respecto al total de los residuos generados.	100%	**Muy bueno**	Para considerarse adecuados, los rellenos sanitarios deben contar con recolección y tratamiento de lixiviados y gas residual.
Cobertura de recolección diferenciada de residuos sólidos	Porcentaje de hogares con servicio de recolección diferenciada de residuos sólidos.	0 %	**Muy malo**	El indicador considera la recolección de material aprovechable y del destinado a la disposición final de manera separada contemplada dentro del esquema de gestión de residuos sólidos.
Porcentaje de residuos domiciliarios aprovechados	Porcentaje de residuos aprovechados con respecto al total de residuos domiciliarios potencialmente aprovechables generados en el proyecto de estudio.	16.4 %	**Malo**	El indicador se centra en residuos domiciliarios aprovechados teniendo en cuenta la naturaleza residencial del proyecto estudiado. Los rangos para la comparación se definieron para la composición específica de los residuos de CV.
Porcentaje de RCD generados en la construcción que son aprovechados	Fracción de los residuos de demolición y construcción (RCD) generados durante la fase de construcción del proyecto que son reutilizados o reciclados.	34.7 %	**Regular**	A pesar de que durante la operación del proyecto se genera RCD en la remodelación de viviendas, se consideró para el indicador sólo el aprovechamiento de los RCD durante la fase de construcción.
Generación de residuos domiciliarios per cápita	Cantidad de residuos domiciliarios generados por habitante del proyecto al año.	200 kg/hab/año	**Bueno**	A pesar de los diferentes tipos de residuos generados en Ciudad Verde, se seleccionó la generación de residuos domiciliarios como indicador dada la naturaleza residencial del proyecto y porque constituyen la mayor parte de la totalidad de los residuos generados a nivel de un municipio.
Desperdicio evitable de alimentos per cápita	Cantidad anual de desperdicio evitable de alimento en la etapa de consumo final.	32 kg/hab/año	**Bueno**	Si bien el indicador incluye también el desperdicio en la fase de distribución, para la comparación con valores de referencia y dada la disponibilidad de información, se empleó el valor nacional de desperdicio evitable de alimentos generado solamente en la etapa de consumo final.
Emisiones de CO_2-eq por gestión de residuos	Cantidad de GEI por habitante emitidos por la gestión de residuos generados en el proyecto de interés.	0.046 tCO_2eq/hab/año	-	Para este cálculo se tuvo en cuenta los residuos de origen domiciliario, residuos de poda y corte de césped, residuos de barrido generados y residuos de construcción en Ciudad Verde en el año base.

- **Asequibilidad del servicio de aseo**

La asequibilidad del servicio de aseo se calculó teniendo en cuenta el valor promedio de ingreso mensual por hogar encontrado en la encuesta a los habitantes de Ciudad Verde y los datos sobre el cobro por el servicio de aseo por parte de la empresa Aseo Internacional S.A. E.S.P. durante el año 2018 reportados en los informes mensuales de su página web. Las tarifas para estrato 1 y estrato 3 por servicio de aseo son diferentes, por lo que el indicador se cuantificó considerando que las viviendas estrato 1 en Ciudad Verde en 2018 constituían el 2% de las viviendas del proyecto.

Tabla 21. Datos de ingresos mensuales y cobro de aseo para los habitantes de Ciudad Verde

Ingresos mensuales ($/hogar)	$ 1,719,782.43*
Cobro de aseo mensual ($/suscriptor)	$ 16,316

*Valor ajustado considerando la inflación

De acuerdo con los datos presentados, el gasto en servicio de aseo constituye en 0.95% del ingreso total de los hogares en Ciudad Verde, valor calificado como bueno comparado con valores de referencia, en los que se indica que el cobro al usuario por la gestión de residuos debe constituir entre 1 y 1.5% de los ingresos del hogar [19]. Ahora bien, si se compara el cobro por el servicio de aseo con el *ingreso libre*[4] de los hogares de Ciudad Verde, utilizando información de las encuestas realizadas a los habitantes de Ciudad Verde y con datos del DANE para el municipio de Soacha, se encuentra que, en caso de que deba destinarse parte de los ingresos para el pago de arriendo o leasing, el ingreso de los hogares es insuficiente para cubrir los gastos definidos como esenciales para el cálculo de este indicador, lo que resulta en un valor de asequibilidad negativa (-12.4%). Este resultado puede evidenciar la supresión o minimización de gastos de importancia significativa en los hogares. Por otro lado, a pesar de la calificación positiva de este indicador, una de las quejas respecto al sector de residuos en los grupos focales fue el alto costo del servicio de recolección. Esto puede atribuirse a que la aproximación realizada de los gastos de los hogares de Ciudad Verde con base en la encuesta multipropósito puede no estar ajustada a la situación real los gastos mensuales de los participantes de los grupos focales. De igual forma, esta inconformidad puede indicar la necesidad de mayor claridad frente a los habitantes respecto al cobro realizado por los servicios prestados por la empresa de aseo, pues por lo general este servicio público se cobra en el mismo recibo que otros.

- **Nivel de cumplimiento de derechos laborales**

Para la estimación del indicador en Ciudad Verde, la información sobre la afiliación a ARL fue obtenida del Censo de Población Recicladora de Oficio (PRO) 2019 [20] en el marco del Plan Gestión Integral de Residuos Sólidos del Municipio de Soacha (PGIRS). En cuanto a los trabajadores de la empresa de Aseo Internacional S.A. E.S.P. se asumió que los 381 empleados activos en 2018 [21] contaban con afiliación a ARL, dada la formalidad asociada a la empresa de servicios públicos. De igual forma, se supuso que los 70 trabajadores del área administrativa y operativa del relleno sanitario Nuevo Mondoñedo S.A. E.S.P. [22] se encontraban afiliados a ARL. En el caso de la PRO de oficio y los trabajadores de la empresa de aseo de Soacha, se aproximó la

[4] El ingreso libre por hogar se calcula como el ingreso resultante después del pago de gastos básicos, dentro de los que se consideró el gasto por arriendo, electricidad, gas, telefonía, alimentos y bebidas no alcohólicas, vestuario, salud, transporte, educación y acueducto y alcantarillado. Los datos del gasto en energía eléctrica, gas y transporte fueron obtenidos de la encuesta realizada en Ciudad Verde y la tarifa pagada por acueducto y alcantarillado se obtuvo a partir de información de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAB-ESP). Para los demás datos se utilizan los valores de gastos de la encuesta multipropósito para Soacha 2017.

cantidad de trabajadores que ejercen su actividad relacionada con los residuos generados en Ciudad Verde ponderando por el número de habitantes del macroproyecto respecto a la población de Soacha. Por su parte, la aproximación de los trabajadores del relleno sanitario se realizó ponderando con la cantidad de residuos generados por Ciudad Verde que fueron dispuestos en 2018 (sección 6.2) respecto a la cantidad total de residuos dispuestos en el relleno durante ese año [22].

$$\%\, Trabajadores\ afiliados\ ARL = \frac{\#\ trabajadores\ afiliados\ ARL}{\#\ Total\ trabajadores\ gestión\ de\ residuos} * 100$$
$$= \frac{91}{498} * 100 = \mathbf{18.3}\%$$

El indicador de nivel de cumplimiento de derechos laborales muestra que el 18.3% de los trabajadores de las etapas de gestión de residuos, excluyendo las estaciones de transferencia y centros de acopio, cuentan con afiliación a ARL; lo que significa que sólo este porcentaje está asegurado frente a enfermedades o accidentes causados en o por su trabajo. A pesar de que el resultado del indicador es del 18.3%, si se evalúa por separado la fracción de la PRO que se encuentra afiliada a ARL, el indicador es 1.6%, lo que indica la importancia de plantear medidas para la mejora de las condiciones laborales de esta población que asciende a 1984 habitantes de acuerdo con el Censo de Población Recicladora de Oficio (PRO) de Soacha 2019 [20]. Además, la situación de esta población se agrava si se considera que 21.2% de la PRO encuestada manifestó no encontrarse afiliada al sistema de seguridad social.

- **Cobertura de recolección domiciliaria de residuos sólidos**

La estimación de la cobertura de recolección de residuos sólidos domiciliarios se realizó con base en la información reportada por la empresa Aseo Internacional S.A. E.S.P.[23], prestadora del servicio de aseo en el municipio de Soacha. Se define un resultado de **100%** para este indicador, lo que evidencia que la totalidad de los residuos sólidos domiciliarios generados en Ciudad Verde son recolectados por la empresa de aseo o por la PRO. La recolección total de los residuos domiciliarios generados permite el posterior aprovechamiento o disposición final. Es importante mencionar que existen otros flujos de residuos adicionales a los de origen domiciliario, por ejemplo, residuos de construcción y demolición, que también deben ser recolectados y gestionados adecuadamente.

- **Porcentaje de residuos dispuestos adecuadamente**

En cuanto a los residuos que son enviados para disposición final, se encuentra que el indicador para disposición final adecuada de los residuos generados es del **100%**. Lo anterior se debe a que los residuos de Ciudad Verde que no son recogidos por la PRO, son dispuestos en el relleno sanitario Nuevo Mondoñedo, que cuenta con recolección y tratamiento de lixiviados y biogás. Cabe recalcar que la disposición final adecuada y aprobada por la legislación no necesariamente es la óptima o la que aprovecha los recursos que pueden obtenerse de los residuos aún en los sitios de disposición final, lo que representa una oportunidad de mejora en esta etapa de gestión de los residuos.

- **Cobertura de recolección diferenciada de residuos sólidos**

A pesar de que la cobertura de recolección de residuos sólidos domiciliarios es completa para Ciudad Verde, el municipio no ha implementado ruta de recolección selectiva [24] para recoger de manera separada los residuos aprovechables y los no aprovechables, por lo que el valor de este indicador para este indicador es 0%. La recolección no separada de residuos puede representar un impacto en el potencial de reciclaje y reutilización de los residuos, pues el nivel de separación en la fuente influye en la cantidad de residuos que no están contaminados y pueden ser reciclados y la

calidad de los materiales extraídos [25]. Además, de acuerdo con lo manifestado por los habitantes de Ciudad Verde durante los grupos focales realizados, la recolección no diferenciada desincentiva la separación desde la fuente.

- **Porcentaje de residuos domiciliarios aprovechados**

En el contexto del proyecto de vivienda analizado, se consideró pertinente evaluar el indicador de residuos aprovechados sobre el total de residuos potencialmente aprovechable de origen domiciliario, dado el grado de avance y oportunidad de aprovechamiento de estos residuos en comparación con los residuos generados de tipo RCD, RESPEL, municipales o de manejo especial. Se consideró como material potencialmente aprovechable el cartón, papel, plástico, vidrio, metales y materia orgánica[26], que constituyen el 88.7% de los residuos domiciliarios generados en Ciudad Verde.

Tabla 22. Cantidad de residuos potencialmente aprovechables de Ciudad Verde generados y aprovechados en 2018

Residuos potencialmente aprovechables	**Generados CV (t/año)**	**Aprovechados CV (t/año)**
Cartón	2,292.9	1,912.6
Papel	1,870.6	524.3
Plástico	9,027.2	746.9
Vidrio	1,207.9	143.5
Metales	793.7	562.8
Materia orgánica	8,514.1	0.0
TOTAL	23,706.4	3,890.1

De acuerdo con la composición mostrada anteriormente, se calculó el valor del indicador para Ciudad Verde en 2018:

$$\%\, RSU_A = \frac{RSU_A}{RSU_{PA}} * 100 = \frac{3{,}890.1 \frac{t}{\text{año}}}{23{,}706.4 \frac{t}{\text{año}}} * 100 = \mathbf{16.4}\%$$

El indicador para Ciudad Verde muestra que 16.4% de los residuos potencialmente aprovechables generados son aprovechados mediante reúso o reciclaje. Los materiales con mayor aprovechamiento son el cartón y los metales, mientras que el vidrio y el plástico presentan bajas tasas de aprovechamiento, lo que puede indicar la necesidad de intervención en la separación y recolección del material, limitaciones tecnológicas que impiden un aprovechamiento mayor, y ausencia de estrategias económicas para incentivar esta actividad. Por su parte, la materia orgánica generada es enviada en su totalidad al relleno sanitario, lo que demuestra una gran oportunidad para su aprovechamiento y reducción en la emisión de GEI. A pesar de que la tasa de aprovechamiento sobre el total de residuos generados de Ciudad Verde (15.4%) se encuentra muy cerca a la meta nacional de 17.9% para la tasa de reciclaje en 2030 [27], la experiencia internacional evidencia la amplia brecha existente entre el potencial de aprovechamiento para algunos materiales y el nivel actual y esperado de aprovechamiento en el país.

- **Porcentaje de RCD generados en la construcción que son aprovechados**

Para el caso de los RCD generados en la construcción del proyecto, la tasa de aprovechamiento de se estimó sobre el total de los residuos generados e, igualmente, los valores de referencia empleados para la comparación del indicador consideraban los residuos aprovechados sobre el total de residuos

generados. La estimación del porcentaje de aprovechamiento de los RCD generados en la construcción de las edificaciones residenciales e institucionales en Ciudad Verde se realizó a partir de los datos reportados por la empresa constructora Amarilo para la generación y aprovechamiento de RCD durante la construcción de VIS y VIP en el año 2017 [28]. De acuerdo con lo expresado por la constructora en su Informe de Sostenibilidad, se asumió que todo el papel/cartón, PVC, plástico y madera fue aprovechado.

Tabla 23. Cantidad de RCD generados y aprovechados construcción de VIS/VIP Amarilo 2017. Adaptado de [28]

	Excavación	Escombros	Chatarra	Papel/cartón
Generado (kg)	54,672,750	19,781,000	84,128	1,855
Aprovechado (kg)	25,581,600	262,000	18,686	1,855
Tasa de Aprovechamiento	47%	1%	22%	100%

	PVC	Plástico	Madera	RESPEL	Icopor	**TOTAL**
Generado (kg)	1,225	671	43,616	1	12,673	74,597,919
Aprovechado (kg)	1,225	671	43,616	0	0	25,909,653
Tasa de Aprovechamiento	100%	100%	100%	0%	0%	35%

El resultado de este indicador muestra que el 35% de los residuos generados durante la construcción del proyecto de vivienda son reusados o reciclados. Si se analiza por separado los diferentes tipos de materiales, se observa que la mayor cantidad corresponde a residuos de excavación y cerca de la mitad de ellos son aprovechados. Los escombros representan el 26% de los residuos generados, pero solamente se aprovecha el 1%. Por su parte, la chatarra, tercera en cantidad dentro de los residuos generados, presenta un 22% de aprovechamiento aun cuando materiales como el acero pueden tener un nivel de aprovechamiento de hasta 97% [29].

- **Generación de residuos domiciliarios per cápita**

La generación de residuos domiciliarios per cápita para el año 2018 en Ciudad Verde se definió a partir de la información suministrada por el PGIRS del Municipio de Soacha para el año 2015[24]. Se consideró que la variación de la composición y generación de los residuos desde 2015 hasta el año base no es significativa, por lo que se asumió el valor de producción de residuos per cápita de la cabecera municipal de Soacha como representativo para la población de Ciudad Verde en 2018.

$$Generación\ de\ residuos\ per\ cápita = 0.548 \frac{kg}{hab * día} * 365 \frac{día}{año} = \boxed{\mathbf{200.0} \frac{\boldsymbol{kg}}{\boldsymbol{hab * año}}}$$

La generación de residuos per cápita en el proyecto permite evaluar el impacto de acciones propuestas que busquen reducir la generación de residuos desde la fuente, como medida fundamental en la gestión integral de residuos sólidos. De acuerdo con el resultado de este indicador, la generación de residuos domiciliarios per cápita en Ciudad Verde es baja en comparación con la generación en algunos países de América Latina y el mundo [25]. No obstante, esta buena condición, como filosofía de la gestión de residuos, siempre debe fortalecerse la disminución en la producción per cápita, independientemente del nivel de generación. Este indicador podría sugerir que la principal problemática a abordar de manera prioritaria es el aprovechamiento de los residuos generados teniendo en cuenta su composición. Es importante considerar también la forma en la que se mide en los municipios la generación de residuos per cápita, para tener un resultado lo más cercano posible a la realidad y proponer medidas basadas en esta medición.

- **Desperdicio evitable de alimentos per cápita**

Para los proyectos de vivienda como el caso de estudio, se definió el indicador de desperdicio evitable de alimentos per cápita en la fase de distribución y consumo, asumiendo que la producción y procesamiento se realizan fuera del macroproyecto. Dada la información disponible para la estimación del indicador de desperdicio de alimento en la fase de distribución, se limitó el análisis solamente al desperdicio en etapa de consumo, sin embargo, se recomienda evaluar esta fase de la cadena cuando se cuente con la información necesaria para la estimación del indicador, ya sea a través de balances de masa o mediciones directas. Para el caso del desperdicio evitable en el consumo se propone la estimación basada en la caracterización de residuos domiciliarios realizada por parte del PGRIS del municipio. Sin embargo, en la caracterización de los residuos reportada para Soacha no se presenta el porcentaje de residuos correspondiente a alimentos comestibles sino un valor general para materia orgánica. Por esta razón, para la evaluación aproximada de este indicador se utilizó el valor determinado para Colombia por el DANE en 2016 de **34 kg/cápita** al año [30]. De manera similar al indicador de generación de residuos per cápita, los valores de desperdicio de alimento en fase de consumo para Colombia son bajos en comparación con países con mayor ingreso económico, no obstante, como parte de las metas asociadas a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, se establece para 2030 la diminución a la mitad del desperdicio de alimentos per cápita en la fase de distribución y consumo final [31][27]. Para monitorear el cumplimiento de esta meta a nivel municipal o de proyectos de vivienda sería de utilidad el establecimiento de mediciones de desperdicio evitable de alimento que pueden incorporarse en la caracterización de residuos realizada en los municipios, o a través de diarios o bitácoras, entrevistas o encuestas, pesaje directo de los alimentos desperdiciados, conteo o evaluación de volumen ocupado por los residuos, entre otros métodos de medición [32].

- **Emisiones de CO_2-eq por gestión de residuos**

Las emisiones de GEI por habitante se calcularon teniendo en cuenta las emisiones por el transporte de los residuos domiciliarios, de poda y corte de césped y de barrido desde Ciudad Verde hasta el relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo y las emisiones por la descomposición anaerobia de estos residuos en el relleno. Además, se incluyeron las emisiones por el transporte de los RCD generados por la construcción de viviendas hasta el sitio de disposición final. Se obtuvo un valor de 0.046 t CO_2-eq para el año 2018[5], en el que el 87.1% correspondía a la descomposición de residuos en el relleno sanitario. Para este año el 4.3% de las emisiones se atribuyen al transporte de residuos domiciliarios, de poda y corte de césped y de barrido hasta el relleno sanitario y el 8.6% restante de las emisiones se generó por el transporte de RCD producidos en la construcción de edificaciones durante el año del estudio. Si bien las emisiones por descomposición de residuos en el relleno representan la mayor cantidad de emisiones del sector, la cantidad de CO_2-eq per cápita del relleno en este caso de estudio (0.040 $tCO_{2\text{-}eq}$/año) es menor que las emisiones per cápita reportadas por el inventario nacional de las emisiones provenientes de *Sitios gestionados de eliminación de desechos* (0.13 $tCO_{2\text{-}eq}$/año) para 2014 [33]. Esto puede atribuirse a la baja cantidad de residuos domiciliarios generados y el bajo contenido de material rápidamente putrescibles en los residuos de Ciudad Verde, además, el análisis de la descomposición de residuos en el relleno se realizó considerando los residuos dispuestos desde 2011, año del comienzo de ocupación de las viviendas de Ciudad Verde.

[5] El procedimiento detallado del cálculo de las emisiones consideradas se encuentra en la sección 6.2 (Línea base del sector residuos)

- **Resultados de la evaluación comprensiva difusa**

Una vez obtenida la estimación de cada uno de los indicadores propuestos para este sector, se procedió a realizar la evaluación difusa de los mismos. La Figura 21 presenta el resultado de evaluación de los 9 indicadores considerados por el sector Gestión de residuos, los cuales en su totalidad fueron definidos de tipo cuantitativo.

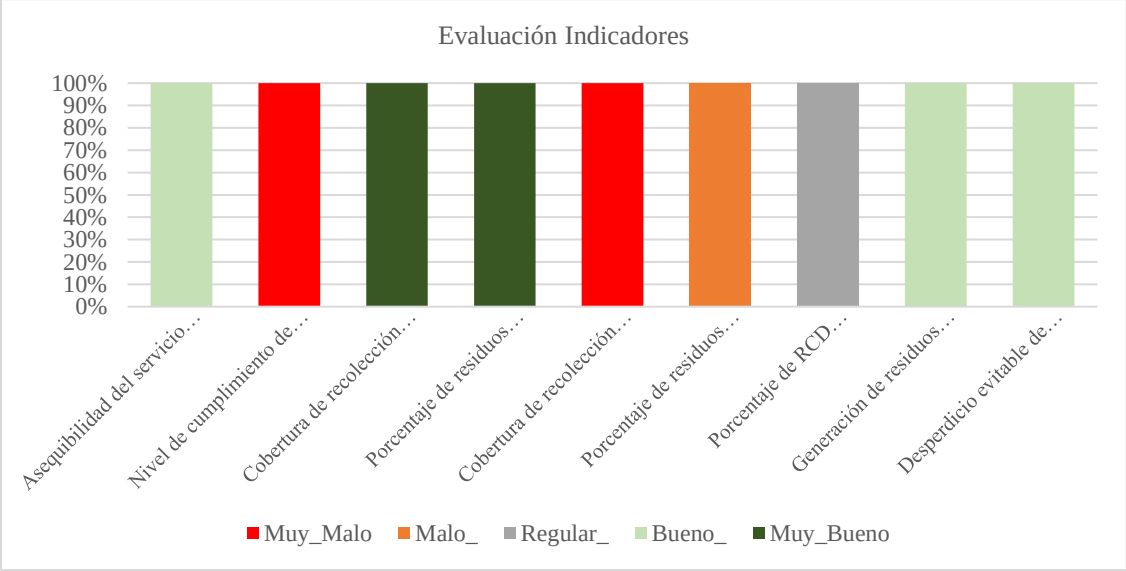


Figura 21. Evaluación de indicadores sector gestión de residuos

De la Figura 21 se puede analizar que la totalidad de los indicadores, dada la definición de las funciones de pertenencia, fueron evaluados con un 100% de pertenencia a las diferentes etiquetas lingüísticas utilizadas para la evaluación. Por ejemplo, los indicadores "Cobertura de recolección domiciliaria de residuos sólidos" y "Porcentaje de residuos dispuestos adecuadamente" pertenecen en un 100% a la etiqueta "Muy Bueno", mientras que los indicadores "Nivel de cumplimiento de los derechos laborales" y "Cobertura de recolección diferenciada de residuos sólidos" pertenecen en un 100% a la etiqueta "Muy Malo".

Por otro lado, la Tabla 24 presenta la evaluación final y los grados de pertenencia asociados a cada uno de los indicadores. Es así como este sector tiene 2 indicadores evaluados como "Muy Bueno", 3 indicadores evaluado en "Bueno", un indicador evaluado como "Regular", un indicador evaluado como "Malo" y finalmente, 2 indicadores evaluados como "Muy Malo".

Tabla 24. Evaluación final de indicadores sector gestión de residuos: grado de pertenencia y etiqueta lingüística

Indicador	Grado de pertenencia	Etiqueta lingüística de evaluación
Asequibilidad del servicio de aseo	1.000	Bueno
Nivel de cumplimiento de los derechos laborales	1.000	Muy Malo
Cobertura de recolección domiciliaria de residuos sólidos	1.000	Muy Bueno
Porcentaje de residuos dispuestos adecuadamente	1.000	Muy Bueno
Cobertura de recolección diferenciada de residuos sólidos	1.000	Muy Malo
Porcentaje de residuos domiciliarios aprovechados	1.000	Malo
Porcentaje de RCD generados en la construcción que son aprovechados	1.000	Regular
Generación de residuos domiciliarios per cápita	1.000	Bueno
Desperdicio evitable de alimentos per cápita	1.000	Bueno

En la Tabla 25 se presentan los pesos para los indicadores acorde con cada una de las 4 etapas definidas por este sector y los indicadores que son considerados para la evaluación según la etapa correspondiente. Por ejemplo, la etapa "Ciudad con disposición final adecuada" considera para su proceso de evaluación 4 indicadores con sus respectivos pesos, a saber: "Asequibilidad del servicio de aseo", "Nivel de cumplimiento de los derechos laborales", "Cobertura de recolección domiciliaria de residuos sólidos" y "Porcentaje de residuos dispuestos adecuadamente". Es importante resaltar que para la evaluación de una "Ciudad que minimiza su generación de residuos y promueve el reúso o aprovechamiento desde el diseño de los productos" se consideran la totalidad de los indicadores propuestos por el sector Gestión de residuos.

Tabla 25. Pesos asignados a los indicadores según la etapa sector gestión de residuos

Indicador	**Etapas**			
	Ciudad con cobertura total de recolección de residuos	**Ciudad con disposición final adecuada**	**Ciudad con correcta separación en la fuente y recolección diferenciada de residuos - Ciudad con reúso, aprovechamiento material y energético de sus residuos**	**Ciudad que minimiza su generación de residuos y promueve el reúso o aprovechamiento desde el diseño de los productos**
Asequibilidad del servicio de aseo	33.33%	29.17%	17.86%	17.50%
Nivel de cumplimiento de los derechos laborales	33.33%	29.17%	17.86%	17.50%
Cobertura de recolección domiciliaria de residuos sólidos	33.33%	12.50%	3.57%	2.50%
Porcentaje de residuos dispuestos adecuadamente		29.17%	7.14%	5.00%
Cobertura de recolección diferenciada de residuos sólidos			17.86%	7.50%
Porcentaje de residuos domiciliarios aprovechados			17.86%	7.50%
Porcentaje de RCD generados en la construcción que son aprovechados			17.86%	7.50%
Generación de residuos domiciliarios per cápita				17.50%
Desperdicio evitable de alimentos per cápita				17.50%

La evaluación final de cada una de las etapas definidas para este sector se da en un rango de 0 a 100% y los resultados son presentados en la Tabla 26. De la tabla se puede observar que la etapa "Ciudad con disposición final adecuada" presenta el mejor desempeño con una valoración de 50.930% correspondiendo a una evaluación lingüística de "Malo" con un grado de pertenencia de 0.894, adicionalmente, se puede analizar que dicha etapa tiene una tendencia a la etiqueta lingüística "Regular" con un grado de pertenencia 0.106. De los 4 indicadores considerados para la evaluación de esta etapa, el indicador "Nivel de cumplimiento de los derechos laborales" tiene una valoración de "Muy Malo" y para esta etapa se le asignó un peso de 29.17%, por lo tanto, se puede evidenciar que para mejorar el desempeño de esta etapa este indicador requiere atención prioritaria.

Por otro lado, la etapa "Ciudad con correcta separación en la fuente y recolección diferenciada de residuos - Ciudad con reúso, aprovechamiento material y energético de sus residuos" presenta el peor desempeño con un 39.622%, correspondiendo a una evaluación lingüística "Malo" con un grado de pertenencia de 0.788 a esta etiqueta lingüística. Adicionalmente, las etapas "Ciudad con cobertura total de recolección de residuos" y "Ciudad que minimiza su generación de residuos y promueve el reúso o aprovechamiento desde el diseño de los productos" obtuvieron una evaluación de 47.876% y 48.620% respectivamente. Esta última etapa también contempla el indicador *Compras sostenibles en entidades públicas*, sin embargo, para este caso de estudio no se tuvo en cuenta dada la disponibilidad de información para su estimación en Ciudad Verde. Cabe resaltar que los resultados obtenidos dependen de la definición de las funciones de pertenencia de las etiquetas lingüísticas utilizadas para la evaluación final de las etapas y, además, de los pesos asignados a cada indicador.

Tabla 26. Evaluación final de las etapas sector gestión de residuos

Etapa	Valoración etapa (%)	Etiquetas de evaluación				
		Muy Malo	Malo	Regular	Bueno	Muy Bueno
Ciudad con cobertura total de recolección de residuos	**47.873**	0.000	**0.919**	0.081	0.000	0.000
Ciudad con disposición final adecuada	**50.930**	0.000	**0.894**	0.106	0.000	0.000
Ciudad con correcta separación en la fuente y recolección diferenciada de residuos - Ciudad con reúso, aprovechamiento material y energético de sus residuos	**39.622**	0.212	**0.788**	0.000	0.000	0.000
Ciudad que minimiza su generación de residuos y promueve el reúso o aprovechamiento desde el diseño de los productos	**48.620**	0.164	**0.836**	0.000	0.000	0.000

A partir de la evaluación de indicadores se puede identificar que algunos de ellos como los relacionados con la generación de residuos (domiciliarios y desperdicio de alimentos) y la asequibilidad presentan un desempeño bueno en comparación con valores de referencia. El indicador de aprovechamiento de residuos domiciliarios presenta un desempeño calificado como malo pues, a pesar de que la tasa de aprovechamiento sobre el total de los residuos es cercana a la meta nacional propuesta para 2030, la comparación con valores internacionales evidencia la brecha existente entre el potencial de aprovechamiento de algunos materiales y los niveles actuales en proyecto analizado. De manera similar sucede con el indicador de aprovechamiento de RCD generados en la construcción, evidenciando la oportunidad para aumentar el reúso o reciclaje de algunos materiales como escombros y metales. De acuerdo con lo anterior, si bien se prioriza la reducción en la generación dentro de la jerarquía de gestión de residuos, los resultados de los indicadores demuestran la importancia en este caso de también aumentar el aprovechamiento de los residuos generados. Por otro lado, aunque los indicadores de cobertura de recolección de residuos y disposición final adecuada están calificados como muy buenos, es importante considerar que estas opciones no son las óptimas para favorecer el aprovechamiento de materiales y energía residual presentes en los residuos. El aprovechamiento se incrementaría con la correcta separación en la fuente acompañada con la implementación de la recolección diferenciada de residuos, sin embargo, la recolección de fracciones separadas de residuos no está contemplada dentro del esquema de gestión para Ciudad Verde. Respecto al nivel de cumplimiento de derechos laborales de los trabajadores que participan en la gestión de residuos, este se encuentra calificado como muy malo debido al bajo porcentaje de afiliación a ARL de la Población Recicladora de Oficio.

6.1.5. Movilidad sostenible

Dentro de los principales resultados de percepción de los habitantes de Ciudad Verde se destaca la baja calificación que se le otorga al acceso a los servicios de salud y abastecimiento de alimentos. Debido al déficit al interior de la ciudadela, estos servicios son los que tienen la menor calificación. Los resultados de la encuesta muestran que el 90% de la población tiene que desplazarse fuera de CV para recibir atención médica, el 42% tiene que salir para desarrollar actividades de recreación, 42% por actividades culturales y un 48% para abastecerse de víveres. Los habitantes de la ciudadela mencionan que tienen que hacer estos desplazamientos por falta de oferta de los servicios dentro de Ciudad Verde.

Uno de los resultados que generó sorpresa fue el poco o nulo uso de la bicicleta como medio de transporte, a pesar de la existencia de una red de infraestructura para bicicletas. En los análisis sobre la satisfacción de los encuestados respecto a parámetros relacionados con el uso de modos activos de transporte, se encontró que la falta de bici-parqueaderos y la seguridad son aspectos mal calificados por la población. Adicionalmente, se encontraron otros motivos para no usar bicicleta como falta de tiempo, porque no tienen bicicleta y/o porque no saben manejar este modo de transporte.

En cuanto a temas de percepción de seguridad ciudadana, cerca del 20% reportó sentirse insegura o muy insegura, y específicamente este aspecto se asocia con robos, consumo de drogas en espacios públicos y delincuencia común.

En la Tabla 27 se presentan los resultados de los indicadores estimados para Ciudad Verde. Es necesario aclarar que de la muestra el 32% de las personas no realizan viajes obligatorios. Del porcentaje que, si lo hace, el 77% se desplaza fuera de CV a trabajar o estudiar, mientras que la población restante realiza estás actividades dentro de la ciudadela. Los patrones de movilidad son diferentes para cada caso y se tuvieron en cuenta en la estimación de cada uno de los indicadores.

Tabla 27. Indicadores de Ciudad Verde.

Indicador	Viajes fuera CV	Viajes dentro CV	Total CV	Unidades	Observaciones sobre Ciudad Verde
Nivel de emisiones de dióxido de carbono equivalente por viaje	417	7	417.40	gCO2eq/viaje	- La mayoría de las emisiones se generan en viajes que finalizan fuera de CV. - Las mayores emisiones de CO2eq por viaje corresponden a viajes en vehículos livianos de pasajeros y motocicletas.
Nivel de emisiones de material particulado fino por viaje	0.049	0.0001	0.0376	gPM2.5/viaje	- La mayoría de las emisiones se generan en viajes que finalizan fuera de CV. - Los modos que generan mayores emisiones de PM2.5 por viaje son los que se hacen en motocicletas y en bus tradicional.
Accesibilidad al transporte público local (oferta)	n.a	n.a	6.79	porcentaje	- La población usa modos informales de transporte porque la oferta de transporte público no es suficiente, a pesar de la cobertura en términos espaciales.
Accesibilidad al transporte público masivo (oferta)	n.a	n.a	0	porcentaje	- Ninguna de las estaciones del sistema de transporte masivo está a una distancia menor de 500 metros.
Accesibilidad al transporte (demanda)	538	n.a	538	metros	- Hay personas que tienen que caminar entre 1 y 3 km para acceder al primer modo de transporte. - De los viajes realizados por los encuestados, el 41% toma bus como primer modo y un 39% transporte ilegal.
Exposición personal a material particulado fino en transporte	232	8	182.05	ug/m3	- El modo en el que hay una mayor exposición a material particulado fino es el Transmilenio, debido a los tiempos de viaje a la alta concentración de PM2.5 en la cabina. Este es el modo en el cual se realiza el mayor número de viajes de CV.
Asequibilidad al transporte	18.9%	n.a	18.9	Porcentaje	- Los altos costos del transporte para la población de CV es uno de los temas más críticos y que sobresalió en los grupos focales.

Indicador	Viajes fuera CV	Viajes dentro CV	Total CV	Unidades	Observaciones sobre Ciudad Verde
Tiempo de viaje en viajes obligatorios	93	n.a	93.19	minutos	- Los dos modos con mayores tiempos de viaje asociado son Transmilenio y sistema público tradicional. En éstos el tiempo promedio de viaje es de 113 y 122 minutos respectivamente. Suponiendo dos viajes diarios como mínimo, una persona gastaría más de 3.8 horas al día en viajes obligatorios.
Participación del transporte público en los viajes totales	81%	2%	63.65	porcentaje	- El 67% de los viajes en transporte público se complementa con el uso de modos informales.
Participación de modos no motorizados en los viajes totales	4	93	23.93	porcentaje	- Ninguno de los viajes dentro de CV se realiza en bicicleta.
Infraestructura para uso de bicicleta	n.a	n.a	7.796	km/100000	- A pesar de la existencia de la infraestructura segregada el uso de la bicicleta es casi nulo. - En las visitas se observó que el espacio es utilizado por vendedores informales.
Tasa de movilidad	n.a	n.a	1.63	viaje/persona	- Este dato se tomó de la Encuesta de Movilidad 2019 para el municipio de Soacha.
Autocontención	n.a	24.5%	24.5	Porcentaje	- La población de Ciudad Verde depende en gran proporción de Bogotá y Soacha para trabajar.
Calidad del transporte público	2.61	n.a	2.61	adimensional	- La escala de calificación es de 0 a 5. 5 corresponde a la mejor calificación.
Calidad del entorno urbano	n.a	3.26	3.26	adimensional	- La escala de calificación es de 0 a 5. 5 corresponde a la mejor calificación.
Accesibilidad a equipamientos (salud)	n.a	n.a	3.5	porcentaje	- La región definida para la evaluación de Ciudad Verde comprende el área del municipio de Soacha y Bogotá.
Accesibilidad a equipamientos (colegios)	n.a	92	92.0	porcentaje	- A pesar de la accesibilidad geográfica, los cupos que se ofrecen no son suficientes para la demanda.
Accesibilidad a equipamientos (universidades)	n.a	n.a	0.3	porcentaje	- La región definida para la evaluación de Ciudad Verde comprende el área del municipio de Soacha y Bogotá. Este es uno de los servicios con mayor déficit en la ciudadela y en el municipio.

n.a.: no aplica.

A continuación, se presenta una explicación para cada indicador.

- **Nivel de emisiones de dióxido de carbono equivalente por viaje**

Las emisiones se estimaron teniendo en cuenta los resultados de partición modal de la encuesta por tipo de viaje, la longitud media de los viajes por modo y características de la flota de acuerdo con los registros sobre el parque automotor.

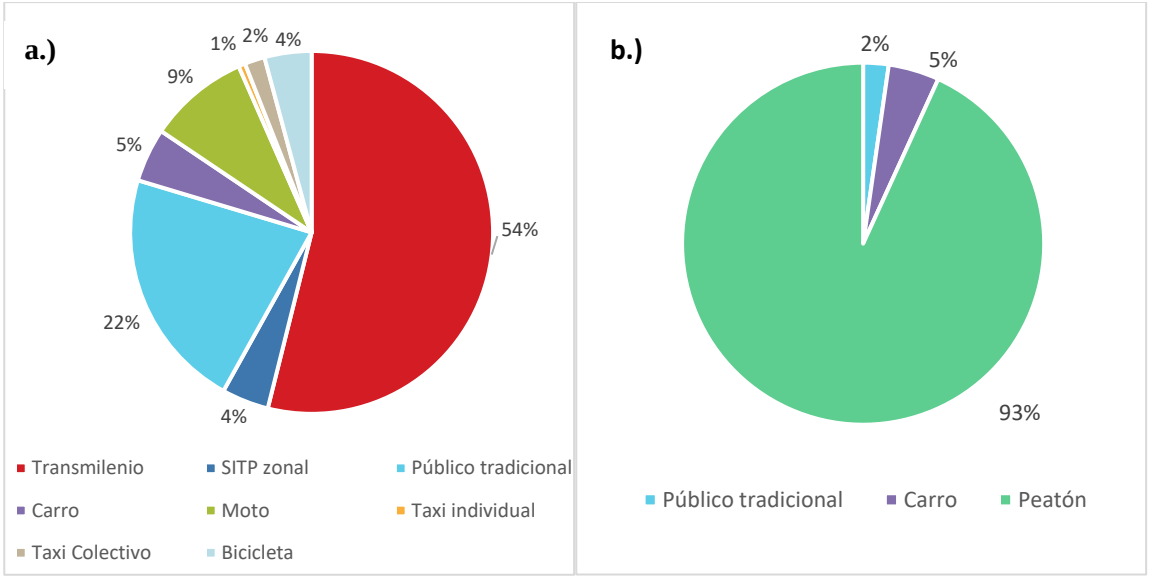


Figura 22. Partición modal de viajes obligatorios con origen en Ciudad Verde. ***a.)*** *Destino fuera de Ciudad Verde.* ***b.)*** *Destino Ciudad verde.*

Para el cálculo de las emisiones se utilizaron los factores de emisión, según las características del combustible y las distancia promedio de los viajes discriminada según el modo de transporte. En la Figura 23 se presentan las emisiones promedio de $CO_{2\text{-eq}}$ por modo de transporte.

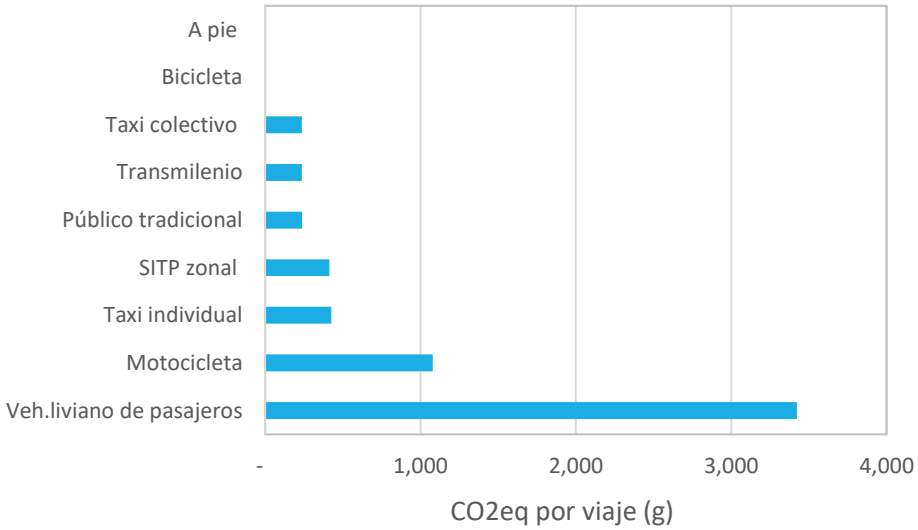


Figura 23. Emisiones de CO_2-eq por modos de transporte.

- **Nivel de emisiones de material particulado fino por viaje**

En este caso, se utilizaron los factores de emisión de la flota local, y las características de reparto modal y longitud de los viajes de acuerdo con los resultados de la encuesta. La Figura 24 presenta los resultados de emisiones de material particulado fino por viaje. Se observa que en este caso un viaje en SITP zonal o moto genera las mayores emisiones. Esto se debe principalmente a las características de la flota, al factor de ocupación y a la distancia media recorrida por cada modo.

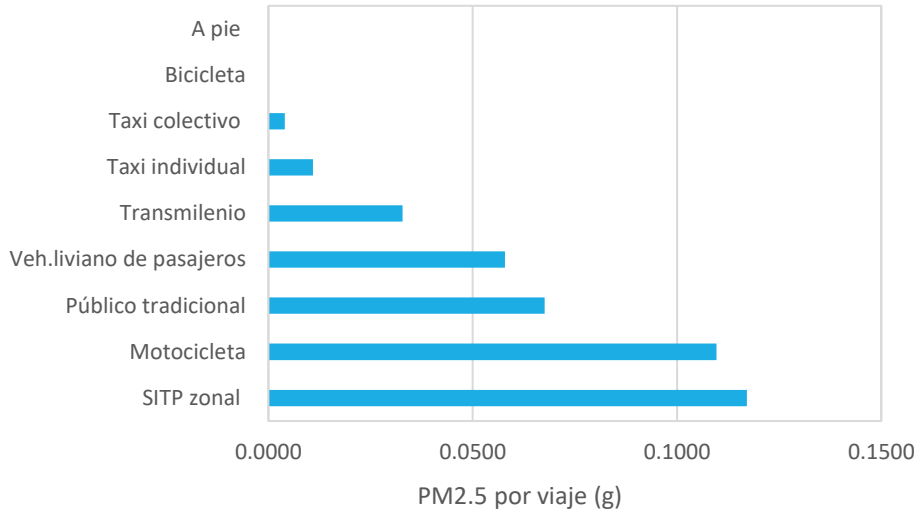


Figura 24. Emisiones de material particulado fino por modos de transporte.

- **Accesibilidad al transporte público local (oferta)**

Para este indicador se realizó un buffer de 500m alrededor del paradero de transporte que está ubicado en CV. A partir del área del buffer y del área total de la ciudadela, se estimó el porcentaje de cobertura del transporte público. Aunque el porcentaje calculado es de 6.79% del área de la ciudadela, la población menciona que usa modos informales de transporte porque la disponibilidad de transporte público no logra suplir la demanda.

- **Accesibilidad al transporte público masivo (oferta)**

La estimación de este indicador se realizó a partir de análisis geográfico, tomando como punto de referencia las estaciones del sistema integrado de transporte en su componente troncal. Se llevó a cabo un análisis en red desde el centroide de Ciudad Verde hasta las estaciones San Mateo, Terreros y León XII. El resultado de este indicador es 0% ya que a partir del análisis geográfico se obtuvo que tan solo el 11,7% de la población de CV se encuentra entre 2 y 3 km de la estación más cercana (Terreros). El 88.3% se encuentra a una distancia superior de los 3 km.

- **Accesibilidad al transporte (demanda)**

Al analizar la distancia que reportaron los encuestados, se encontró que la distancia promedio de caminata es de 538m para tomar el primer modo de transporte.

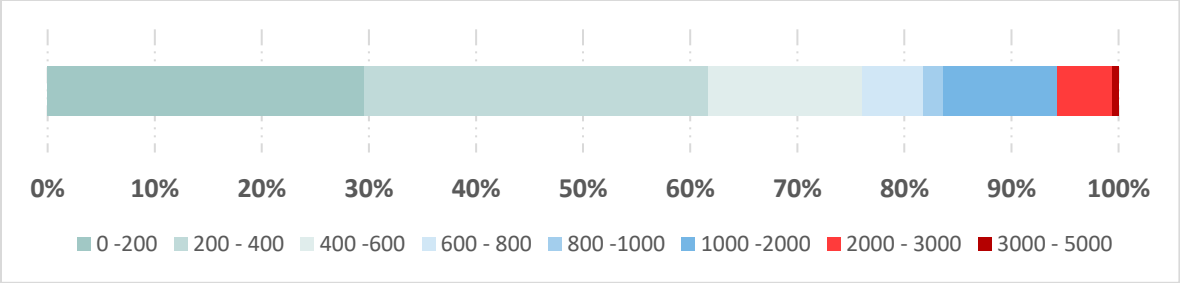


Figura 25. Distancia que caminan los habitantes para acceder al primer modo de transporte.

A partir de los ejercicios de grupos focales se identificó que la población estaba utilizando modos informales para acceder al sistema de transporte público; y esta información fue ratificada con la encuesta realizada. Los viajes, en su mayoría, usan como modos de alimentación transporte informal (taxis colectivos) y transporte público colectivo. Estos dos modos representan el 72% de los viajes realizados por los encuestados (Figura 26).

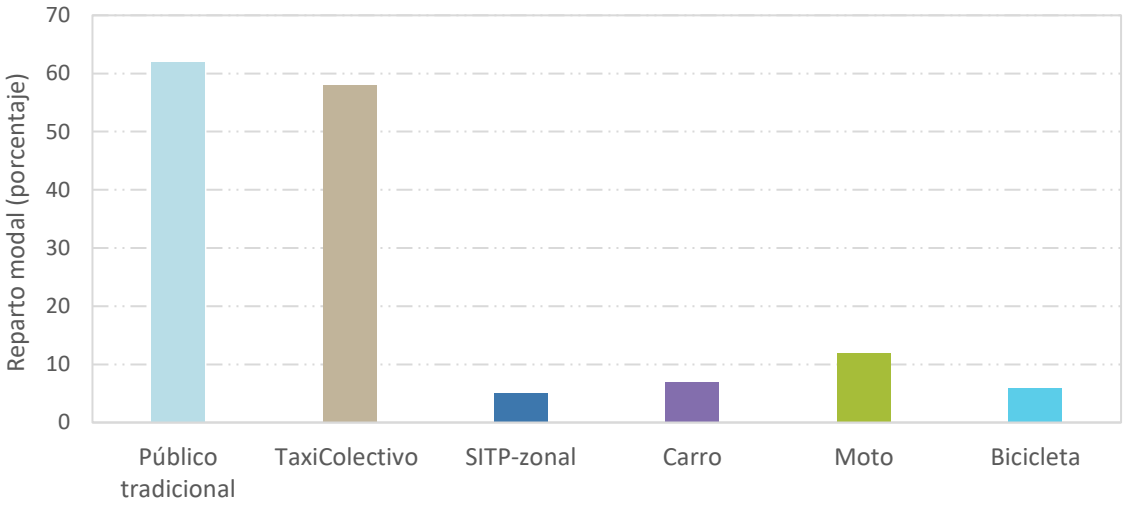


Figura 26. Primer modo de transporte utilizado por la población.

- **Exposición personal a material particulado fino en transporte**

En la Figura 27 se presenta el promedio de las concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas en diferentes modos de transporte de Bogotá, las cuales se utilizan como insumo para los análisis de exposición de la población de CV. Los modos en los que se registran concentraciones más altas de $PM_{2.5}$ son Transmilenio y motocicleta. Teniendo en cuenta además el tiempo promedio de viaje por modo, se obtienen los mayores niveles de exposición personal a $PM_{2.5}$ en el sistema Transmilenio, seguido por el SITP zonal (Figura 28). Estos modos representan el 58% de los viajes obligatorios fuera de CV.

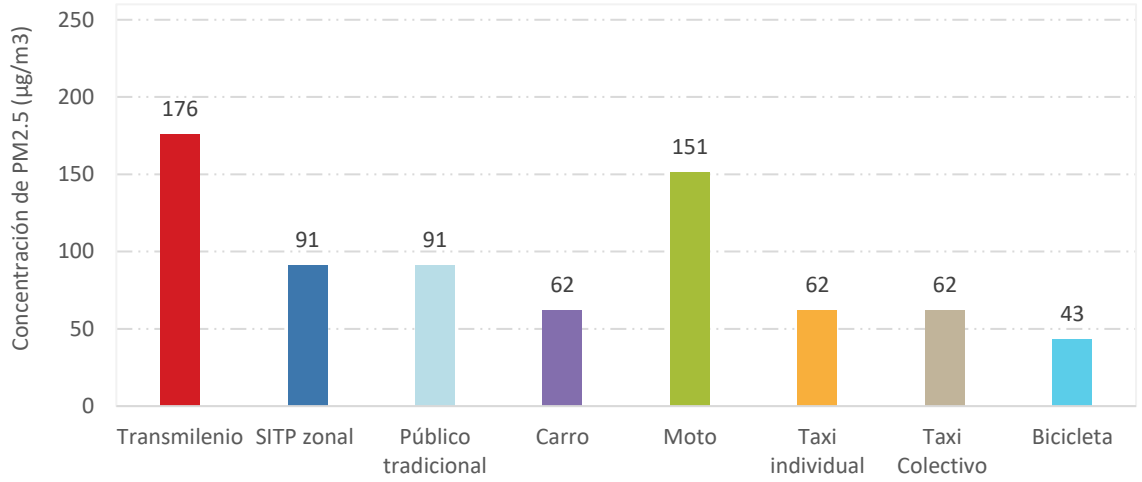


Figura 27. Concentraciones de $PM_{2.5}$ en modos de transporte.

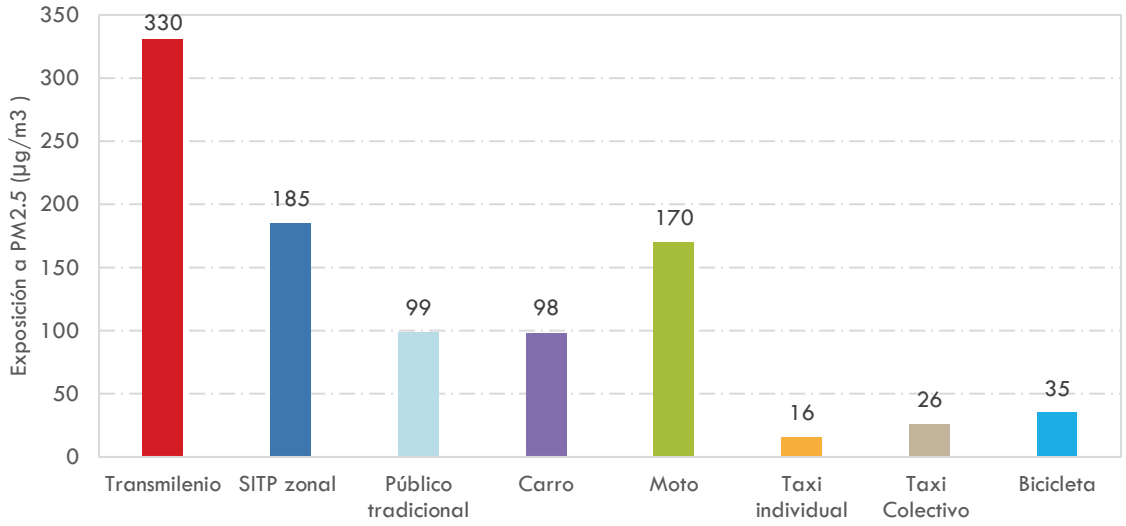


Figura 28. Nivel de exposición a material particulado fino en modos de transporte.

- **Asequibilidad al transporte**

Se reporta el porcentaje de los ingresos mensuales que es destinado para viajes obligatorios de un hogar. En la estimación de este indicador se calculó el ingreso promedio para un hogar de CV ($1,776,084) y el gasto promedio mensual para los viajes obligatorios ($335,165). A partir de esto se obtiene que el 18,9% del ingreso promedio de un hogar en Ciudad Verde es dedicado a actividades de transporte.

- **Tiempo de viaje en viajes obligatorios**

Como ya se ha discutido el 62% de los habitantes realiza sus viajes obligatorios en más de 1 etapa (hasta 4 etapas). Para este indicador se estimó el tiempo de viaje teniendo en cuenta el modo principal, según la jerarquía aplicada en la encuesta de movilidad de Bogotá para el año 2015.

En la Figura 29 se presentas los tiempos de viaje promedio para los viajes obligatorios por cada modo. Las barras completas representan los viajes con destino fuera de ciudad verde y las barras segmentadas representan viajes dentro de la ciudadela.

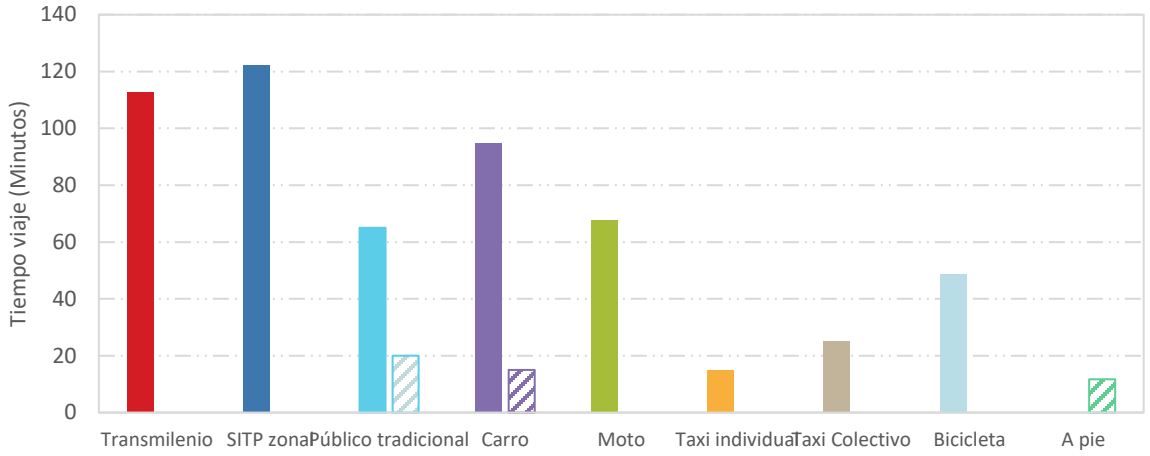


Figura 29. Tiempo de viaje promedio en viajes obligatorios.

- **Participación del transporte público en los viajes totales**

En este indicador se analiza la distribución modal para los viajes dentro y fuera de la ciudadela. En el caso de los viajes que se realizan fuera de Ciudad Verde el 80% se hace en modos de transporte público, mientras que, en los viajes dentro de Ciudad Verde, solo el 2% utiliza estos modos para sus desplazamientos (Figura 30), llevando a cabo una análisis ponderado según el número de viajes realizados en transporte público en Ciudad Verde se obtuvo que el 63.65% de los viajes se hacen en transporte público.

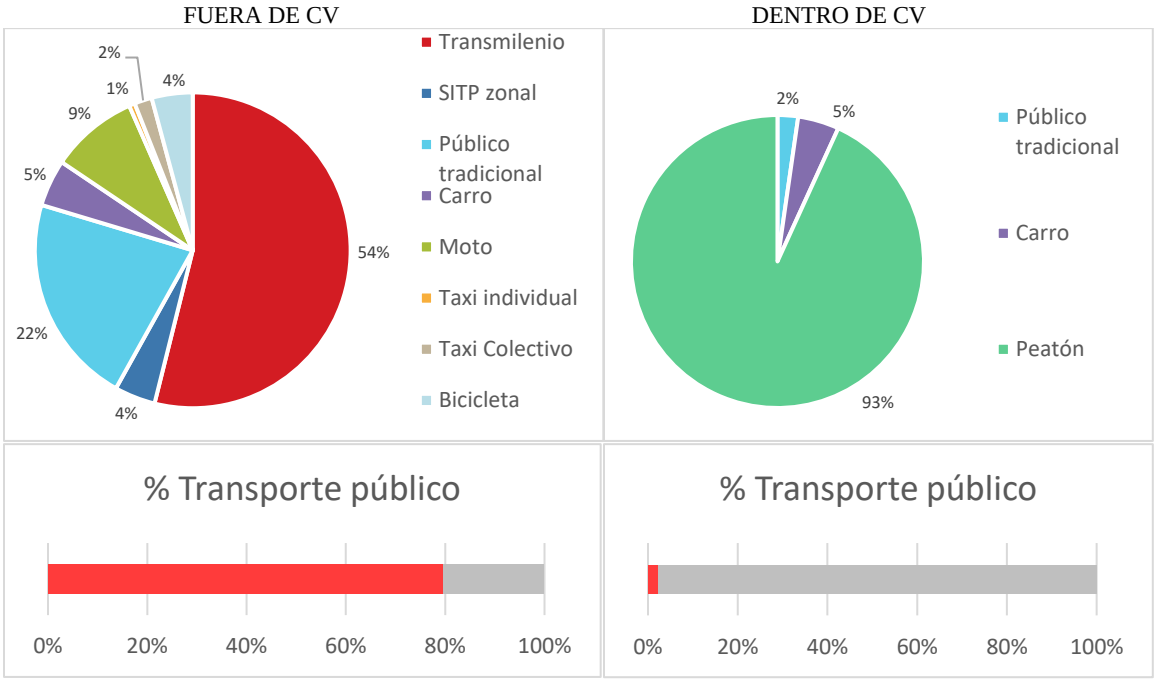


Figura 30. Participación del transporte público en los viajes obligatorios.

- **Participación de modos no motorizados en los viajes totales**

Este indicador refleja el uso de modos activos para realizar viajes y se observa que el 93% de los viajes que se realizan dentro de la ciudadela se realizan como peatón. También resalta el poco número de viajes realizados en bicicleta en viajes fuera de Ciudad Verde, y es aún más sorpresivo que dentro de la ciudadela, en donde los viajes son más cortos, no se realice ningún viaje en este modo (Figura 31). Ahora bien, haciendo un análisis ponderado de la totalidad de los viajes, la participación del transporte no motorizado es del 23.93%.

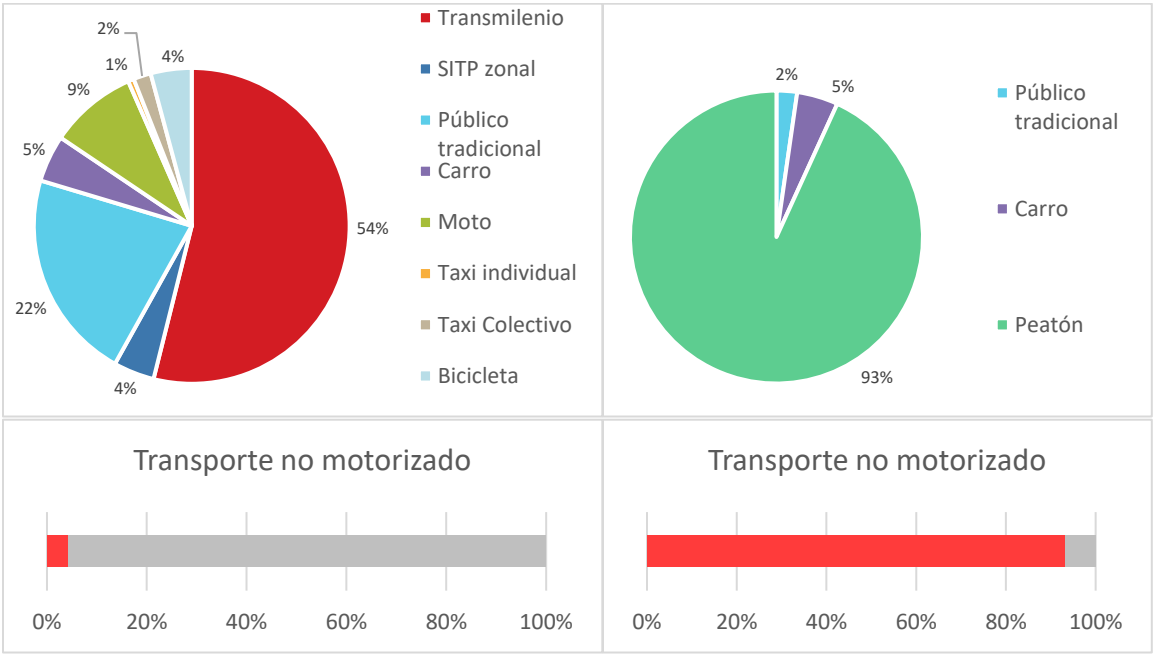


Figura 31. Participación del transporte no motorizado en viajes obligatorios.

- **Infraestructura para uso de bicicleta**

En este indicador se analiza la oferta de ciclo infraestructura (ciclorrutas segregadas) dentro de Ciudad verde. Se obtuvo un valor de 7.79 km de ciclorrutas por cada 100.000 habitantes.

- **Tasa de movilidad**

Tomando como base la encuesta de movilidad realizada por la Secretaria de Movilidad de Bogotá en el año 2019, se pudo establecer que la tasa de viajes por hogar para el municipio de Soacha fue de 5.5 viajes/hogar. Ahora bien, ajustando la tasa con el tamaño de hogar de Ciudad Verde, se obtuvo finalmente que la tasa de viajes por hogar para la urbanización es de 5.7 viajes/hogar. Este valor ajustado al número de habitantes de la urbanización es de 1.63 viajes/persona.

- **Autocontención**

El objetivo de este indicador es establecer la proporción de habitantes que trabajan dentro del área de estudio, respecto al total de habitantes trabajadores. A partir del análisis de la encuesta realizada se pudo establecer que el porcentaje de trabajos que se desarrollan dentro de Ciudad Verde es el 24.5%, el 65.5% de habitantes que trabajan, deben desarrollar sus actividades Bogotá o Soacha.

- **Calidad del transporte público**

Este indicador se estimó con base en la percepción de los habitantes del servicio transporte público en el área de estudio. La calificación ponderada de este indicador fue de 2.61, tomando una escala de referencia de 1 a 5, donde 1 pertenece a la categoría totalmente insatisfecho y 5 a la categoría totalmente satisfecho. Lo que puede interpretarse que en términos generales la población se siente insatisfecha con el servicio de transporte público de la urbanización.

- **Calidad del entorno urbano**

Al igual que el indicador anterior, este se determinó a partir de la percepción de los encuestados, referente a 10 factores que componen el entorno urbano. La valoración promedio de este indicador a partir de la percepción de los habitantes fue de 3.26. En la Tabla 28 se puede observar la calificación de cada uno de los factores evaluados.

Tabla 28. Calificación entorno urbano

Factores	Calificación promedio
Estado del pavimento	4.5
Ancho del andén	4.3
Señalización vial	3.4
Bici parqueaderos	2.1
Semáforos	2.5
Alumbrado público	3.9
Árboles	3.5
Canecas de basura	3.0
Bancas	2.9
Vigilancia	2.3

- **Accesibilidad a equipamientos (salud)**

El objetivo de este indicador es establecer el porcentaje de equipamientos de salud existentes en un radio inferior a 55 kilómetros km respecto al total de equipamientos de salud en la región. La región establecida para efectos de este estudio es la conformada por Bogotá y Soacha. Acorde con el análisis geográfico realizado se pudo establecer que tan solo el 3.5% de los equipamientos de salud es encuentran a una distancia inferior de 5 kilómetros. El 51.5% se encuentran entre 5 y 20 kilómetros, y 46% se encuentran a una distancia superior de 20 kilómetros.

- **Accesibilidad a equipamientos (colegios)**

Este indicador tiene como objetivo establecer el porcentaje de la población que tiene acceso a un colegio en diferentes tiempos de caminata. La velocidad de caminata se estableció a partir de información de recorridos y tiempos obtenidos de la encuesta. Al llevar a cabo el análisis se obtuvo que el 92% de la población está a un tiempo de caminata inferior a los 15 minutos y el 8% está a un tiempo superior de los 15 minutos.

- **Accesibilidad a equipamientos (universidades)**

Al igual que el indicador de accesibilidad (salud), este indicador establece el porcentaje de equipamientos de educación (universidades) existentes en un radio inferior a 5 kilómetros respecto al total de universidades en la región. Acorde con el análisis geográfico realizado se pudo establecer que tan solo el

0.31% de los equipamientos es encuentran a una distancia inferior de 5 kilómetros. El 57.7% se encuentran entre 5 y 20 kilómetros, y 41.9% se encuentran a una distancia superior de 20 kilómetros.

- **Resultados de la evaluación comprensiva difusa**

Una vez obtenida la estimación de los 18 indicadores propuestos para este sector, se procedió a realizar la evaluación difusa de los mismos. La Figura 32 presenta el resultado de evaluación de los indicadores, los cuales en su totalidad fueron definidos de tipo cuantitativo. De la Figura 32 se puede analizar que los indicadores "Tasa de movilidad", "Asequibilidad al transporte", "Participación de modos no motorizados en los viajes totales" y "Nivel de emisiones de dióxido de carbono equivalente por viaje" tienen en su evaluación dos valoraciones lingüísticas indicando que dichos indicadores presentan cualidades asociadas a ambas etiquetas con diferente grado de pertenencia. Por ejemplo, el indicador "Tasa de movilidad" tiene una evaluación de "Regular", dado su mayor grado de pertenencia a esa etiqueta lingüística, con una tendencia a "Malo". Finalmente, se puede observar que los indicadores restantes fueron evaluados con un 100% de pertenencia a las diferentes etiquetas lingüísticas definidas. Por ejemplo, el indicador "Accesibilidad a equipamientos (salud)" pertenece en un 100% a la etiqueta "Muy Malo", mientras que el indicador "Accesibilidad a equipamientos (salud)" pertenecen en un 100% a la etiqueta "Muy Bueno", tal como se presenta en la Figura 32.

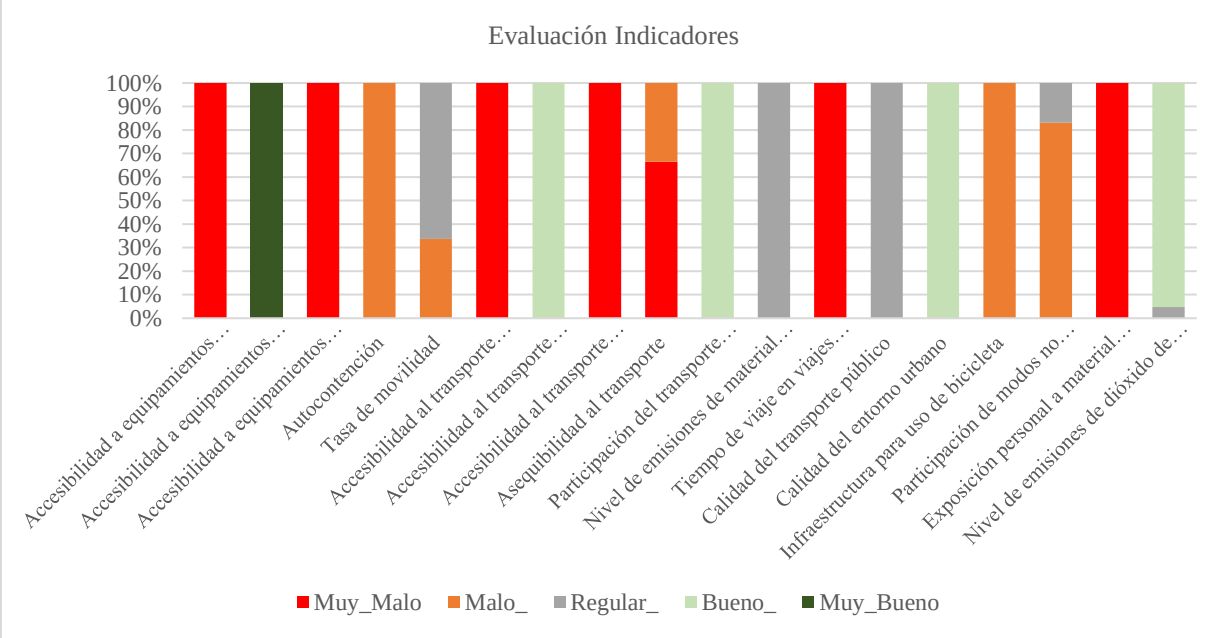


Figura 32. Evaluación de indicadores sector movilidad sostenible

Por otro lado, la Tabla 29 presenta la evaluación final y los grados de pertenencia asociados a cada uno de los indicadores. Es así como este sector tiene un indicador evaluado como "Muy Bueno", 4 indicadores evaluado en "Bueno", 3 indicadores evaluados como "Regular", 3 indicadores evaluados como "Malo" y finalmente, 7 indicadores evaluados como "Muy Malo".

Tabla 29. Evaluación final de indicadores sector movilidad sostenible: grado de pertenencia y etiqueta lingüística

Indicador	Grado de pertenencia	Etiqueta lingüística de evaluación
Accesibilidad a equipamientos (salud)	1.000	Muy Malo
Accesibilidad a equipamientos (colegios)	1.000	Muy Bueno
Accesibilidad a equipamientos (universidades)	1.000	Muy Malo
Autocontención	0.762	Malo

Tasa de movilidad	0.725	Regular
Accesibilidad al transporte público local (oferta)	1.000	Muy Malo
Accesibilidad al transporte (demanda)	0.913	Bueno
Accesibilidad al transporte público masivo (oferta)	1.000	Muy Malo
Asequibilidad al transporte	0.581	Muy Malo
Participación del transporte público en los viajes totales	0.818	Bueno
Nivel de emisiones de material particulado fino por viaje	1.000	Regular
Tiempo de viaje en viajes obligatorios	1.000	Muy Malo
Calidad del transporte público	1.000	Regular
Calidad del entorno urbano	1.000	Bueno
Infraestructura para uso de bicicleta	0.530	Malo
Participación de modos no motorizados en los viajes totales	0.409	Malo
Exposición personal a material particulado fino en transporte	1.000	Muy Malo
Nivel de emisiones de dióxido de carbono equivalente por viaje	0.774	Bueno

En la Tabla 30 se presentan los pesos o ponderaciones para cada uno de los indicadores acorde con las 5 etapas definidas por este sector y los indicadores que son considerados para la evaluación según la etapa correspondiente. Por ejemplo, la primera etapa "Acceso universal a los servicios que ofrece la ciudad" considera para su proceso de evaluación 10 indicadores con sus respectivos pesos y la etapa final "Transporte consistente con mitigación y adaptación al cambio climático" considera la totalidad de los indicadores propuestos por este sector.

Tabla 30. Pesos asignados a los indicadores según la etapa sector movilidad sostenible

Indicador	**Etapas**				
	Acceso universal a los servicios que ofrece la ciudad	**Planeación visión cero**	**Oferta de transporte de buena calidad**	**Calidad de vida como prioridad**	**Transporte consistente con mitigación y adaptación al cambio climático**
Accesibilidad a equipamientos (salud)	10%	9.09%	6.67%	5.88%	5.556%
Accesibilidad a equipamientos (colegios)	10%	9.09%	6.67%	5.88%	5.556%
Accesibilidad a equipamientos (universidades)	10%	9.09%	6.67%	5.88%	5.556%
Autocontención	10%	9.09%	6.67%	5.88%	5.556%
Tasa de movilidad	10%	9.09%	6.67%	5.88%	5.556%
Accesibilidad al transporte público local (oferta)	10%	9.09%	6.67%	5.88%	5.556%
Accesibilidad al transporte (demanda)	10%	9.09%	6.67%	5.88%	5.556%
Accesibilidad al transporte público masivo (oferta)	10%	9.09%	6.67%	5.88%	5.556%
Asequibilidad al transporte	10%	9.09%	6.67%	5.88%	5.556%
Participación del transporte público en los viajes totales	10%	9.09%	6.67%	5.88%	5.556%
Nivel de emisiones de material particulado fino por viaje		9.09%	6.67%	5.88%	5.556%
Tiempo de viaje en viajes obligatorios			6.67%	5.88%	5.556%
Calidad del transporte público			6.67%	5.88%	5.556%
Calidad del entorno urbano			6.67%	5.88%	5.556%
Infraestructura para uso de bicicleta			6.67%	5.88%	5.556%
Participación de modos no motorizados en los viajes totales				5.88%	5.556%
Exposición personal a material particulado fino en transporte				5.88%	5.556%
Nivel de emisiones de dióxido de carbono equivalente por viaje					5.556%

La evaluación final de cada una de las etapas definidas para este sector se da en un rango de 0 a 100% y los resultados son presentados en la Tabla 31. De la tabla se puede observar que las 5 etapas definidas por el sector Movilidad sostenible fueron evaluadas como "Malo" con los respectivos porcentajes de desempeño: 34.998%, 35.020%, 35.556%, 33.781% y 34.993. Cabe resaltar que los resultados obtenidos dependen de la definición de las funciones de pertenencia de las etiquetas lingüísticas utilizadas para la evaluación final de las etapas y, además de los pesos asignados a cada indicador. Los anteriores resultados se deben a que, de los 18 indicadores considerados para la evaluación de las etapas, 10 obtuvieron valoraciones de "Muy Malo" y "Malo" y los restantes 8 indicadores fueron evaluados como "Regular", "Malo" y "Muy Malo". Por tal motivo, es importante analizar los indicadores que requieren atención prioritaria con el objetivo de mejorar el desempeño de las etapas definidas para el macroproyecto, y así lograr para este sector en específico, cambio de paradigma de transporte centrado en vehículos y movilidad, al de sistemas enfocados en la accesibilidad de las personas a los servicios y comodidades que ofrecen las ciudades.

Tabla 31. Evaluación final de las etapas sector movilidad sostenible

Etapa	**Valoración etapa (%)**	**Etiquetas de evaluación**				
		Muy Malo	**Malo**	**Regular**	**Bueno**	**Muy Bueno**
Acceso universal a los servicios que ofrece la ciudad	**34.998**	0.333	**0.667**	0.000	0.000	0.000
Planeación visión cero	**35.020**	0.453	**0.547**	0.000	0.000	0.000
Oferta de transporte de buena calidad	**35.556**	0.331	**0.669**	0.000	0.000	0.000
Calidad de vida como prioridad	**33.781**	0.466	**0.534**	0.000	0.000	0.000
Transporte consistente con mitigación y adaptación al cambio climático	**34.993**	0.493	**0.507**	0.000	0.000	0.000

En general, el análisis de los indicadores de la movilidad sostenible refuerza los hallazgos de los grupos focales. Existe un déficit en oferta de servicios básicos al interior de la ciudadela. La falta de colegios, universidades, centros de salud y centros de empleo genera una alta dependencia de la ciudadela con Bogotá y Soacha. Acorde con los datos recolectados, aproximadamente el 53.8% de la población realiza sus desplazamientos fuera de Ciudad Verde para llevar a cabo estas actividades. Esta situación se hace crítica dada la baja conectividad vial, así como la nula oferta de servicios de transporte formal que permita a los habitantes llegar hasta los sistemas de transporte de Soacha y Bogotá. De hecho, un habitante promedio de la urbanización tiene que caminar entre 2 y 4 kilómetros por trayecto, para acceder a una estación de transporte público masivo. El transporte informal ha jugado un papel predominante en solucionar la conectividad, sin embargo, a un costo para los usuarios muy superior al del transporte formal. Para los habitantes de Ciudad Verde el costo mensual del transporte representa más del 18% del ingreso del hogar.

A los altos costos del transporte, se suman largos tiempos de viaje. Los habitantes que emplean como modo principal de viaje los buses troncales y los zonales del sistema integrado de transporte emplean más de 100 minutos por trayecto. Las emisiones de CO2e por viaje son bajas debido a la alta participación de modos sostenibles, cerca del 80% de los viajes se hacen en transporte público. Sin embargo, los largos tiempos de viaje sumados a altos niveles de concentración de material particulado en los sistemas de transporte predominantes, generan para la población una carga ambiental desproporcionada. A partir de los análisis para Ciudad Verde se identifican diferentes opciones que permitirían solucionar los problemas de accesibilidad, conectividad y asequibilidad de la población de Ciudad Verde, que simultáneamente generan beneficios en reducción de contaminantes globales y locales.

6.1.6. Edificaciones e infraestructura urbana

En la siguiente tabla se resumen los resultados de la evaluación de indicadores para el año base (2018) en Ciudad Verde. A continuación, cada indicador es analizado a partir del estándar y de las características del macroproyecto.

Tabla 32. Evaluación de indicadores del sector de edificaciones e infraestructura urbana

Indicador	Nombre	Descripción	Unidades	Valor año base	Clasificación
1	Porcentaje de viviendas con carácter de desarrollo formal	Define el porcentaje de viviendas que cumplen con la aprobación, por parte de entidades gubernamentales, de la normatividad urbana y especificaciones sismo-resistentes	%	100.0	Muy bueno
2	Porcentaje del tiempo en condiciones de confort de las edificaciones residenciales	Define el número de horas (como porcentaje del total de horas al año) en el que las edificaciones residenciales cumplen con las condiciones de confort térmico especificadas en el ASHRAE 55-17	%	23.5	Muy malo
3	Accesibilidad a edificaciones de servicio (educación)	Define la proximidad media de las agrupaciones de vivienda existentes en el caso de estudio a los equipamientos de uso educativo (colegios y jardines infantiles) que operan dentro del área de estudio.	m	414.50	Bueno
4	Accesibilidad a edificaciones de servicio (salud)	Define la proximidad media de las agrupaciones de vivienda existentes en el caso de estudio a las edificaciones que prestan servicios de salud.	m	2791.0	Muy malo
5	Accesibilidad a edificaciones de servicio (seguridad)	Define la proximidad media de las agrupaciones de vivienda existentes en el caso de estudio a las edificaciones que prestan servicios de seguridad.	m	570.21	Bueno
6	Accesibilidad a edificaciones de servicio (centros comerciales)	Define la proximidad media de las agrupaciones de vivienda existentes en el caso de estudio a los centros comerciales	m	436.79	Bueno
7	Cobertura de servicios educativos	Cuantifica la relación entre oferta y demanda de educación (preescolar, básica primaria y bachillerato) en la zona de análisis.	%	49.01%	Malo
8	Consumo de electricidad durante la operación de las edificaciones residenciales	Define el consumo anual de electricidad por unidad de vivienda, proveniente de la operación de los sistemas de iluminación y electrodomésticos	kWh/und-año	1,349.36	Regular
9	Consumo de gas natural durante la operación de las edificaciones residenciales	Define el consumo anual de gas natural por unidad de vivienda, proveniente de la operación de los sistemas de cocción de alimentos y calentamiento de agua	m^3/und-año	214.52	Bueno
10	Carbono incorporado de las edificaciones residenciales	Cuantifica las emisiones de dióxido de carbono equivalente promedio asociadas a la etapa de producto y a la construcción de las edificaciones residenciales	$kgCO_2$-eq/m^2	227.98	Regular

Indicador	Nombre	Descripción	Unidades	Valor año base	Clasificación
11[6]	Carbono incorporado de la infraestructura urbana	Cuantifica las emisiones de dióxido de carbono equivalente promedio asociadas a la etapa de producto y a la construcción del segmento de paisajismo de la infraestructura urbana	$kgCO_2$-eq/m^2	10.11	-
12	Residuos generados durante la construcción de las edificaciones residenciales	Cuantifica los residuos de construcción que se generan durante la construcción de las viviendas	m^3/m^2	0.116	Regular
13	Porcentaje de RAP utilizado en los pavimentos	Determinar el porcentaje de pavimento asfáltico reciclado (RAP) utilizado en una capa del pavimento	%	0	Muy malo

- **Porcentaje de viviendas con carácter de desarrollo formal**

El indicador tiene un valor para el año base de 100%. Se asignó una calificación de "Muy bueno" al macroproyecto Ciudad Verde, ya que la documentación técnica presentada por los desarrolladores y constructores ante la curaduría urbana cumple todos los requisitos de legalidad conforme a la normatividad urbana establecida y de seguridad en cuanto a la gestión del riesgo ante amenazas naturales y especificaciones asociadas al diseño y construcción sismo-resistente.

- **Porcentaje del tiempo en condiciones de confort de las edificaciones residenciales**

El indicador tiene un valor para el año base de 23.5%. Para la construcción del *benchmarking* se utilizó el modelo adaptativo de confort térmico propuesto en el estándar ANSI/ASHRAE 55-2017 – "Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy" [34]. En la práctica se empleó la herramienta de confort térmico del Center for the Built Environment [35], en su versión más exigente con límites de aceptabilidad del 90% (ver Figura 33). A partir de las modelaciones energéticas realizadas para Ciudad Verde se encontró que la temperatura operativa al interior de las unidades residenciales se encontraba en el rango de aceptabilidad del 90% (19.5°C a 24.5°C) durante el 23.5% del total de horas al año.

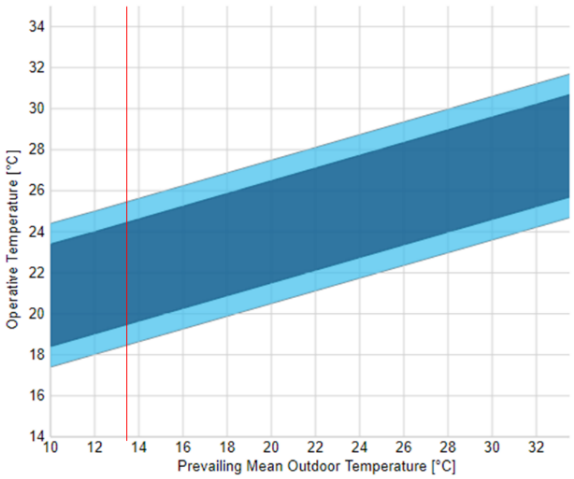


Figura 33. Temperaturas límite del modelo adaptativo para Ciudad Verde

[6] Este indicador, aunque sea parte del análisis, no se incluye dentro de la herramienta ni tiene una clasificación ya que todavía no se cuenta con un número robusto de proyectos para establecer valores de referencia.

- **Accesibilidad a edificaciones de servicio (educación)**

Para el año base, Ciudad Verde contaba con 5 instituciones educativas de educación pre-escolar y escolar. Con base a estas se calculó el indicador de acceso a educación. Al evaluar el cálculo realizado, se evidencia que la mayoría del territorio del macroproyecto tiene fácil acceso a edificios de educación. El análisis arroja que más del 74% de los proyectos de vivienda existentes en Ciudad Verde se encuentran a menos de 500 metros de una edificación que presta servicios de educación básica. Esto permite concluir que el problema descrito por los habitantes de Ciudad Verde, sobre el déficit de centros de educación no está asociado a la proximidad a estos, sino posiblemente a la cobertura que estos tienen sobre la demanda.

- **Accesibilidad a edificaciones de servicio (salud)**

En Ciudad Verde no existen equipamientos de Salud como Hospitales o IPS, que prestan servicio a toda la comunidad. El único equipamiento de salud en el macroproyecto es el Centro de rehabilitación e inclusión infantil Teletón, que no presta servicio a toda la población. Según el testimonio de los habitantes, para acceder a un servicio de salud, siempre requieren salir de la ciudadela. De esta forma, se define que este servicio es inaccesible para los habitantes de Ciudad Verde dentro del macroproyecto. El valor que toma el indicador corresponde a la distancia media desde las agrupaciones de vivienda hasta las instalaciones de servicios de salud más cercanas, fuera de Ciudad Verde.

- **Accesibilidad a edificaciones de servicio (seguridad)**

En el año base, Ciudad Verde tenía instaladas dos edificaciones de servicios de seguridad en operación: una estación y comando de policía, y un centro de atención inmediata (CAI). Al evaluar la proximidad de las agrupaciones de vivienda a estas edificaciones, se encontró que al redor el 50% de las agrupaciones de vivienda se encuentra a menos de 500 metros de acceder a este servicio. Sin embargo, según los grupos focales realizados con la comunidad, la percepción de seguridad de los habitantes parece no estar relacionada con el acceso a este tipo de infraestructura, pues la seguridad es un problema que comúnmente se menciona entre los habitantes del macroproyecto.

- **Accesibilidad a edificaciones de servicio (centros comerciales)**

Para el año base en Ciudad Verde se encontraban construidos y operativos tres centros comerciales, cada uno cuenta con un almacén “ancla” de provisión de alimentos. Sobre estas edificaciones se realizó el análisis de accesibilidad para el indicador. Según los resultados de la evaluación, para el año base ninguna de las agrupaciones de vivienda en el macroproyecto se encuentra en condiciones de mala accesibilidad a los centros comerciales existentes. Menos del 10% de las agrupaciones de vivienda se encuentra a más de 500 metros de algún centro comercial. Al confrontar este hecho con la opinión de los habitantes, se puede concluir que, el problema con este tipo de servicio no radica en la proximidad para acceder a este, sino en la capacidad de estos de satisfacer la demanda de toda la ciudadela.

- **Cobertura de servicios educativos**

Según los datos del Censo nacional 2018 de Colombia [36], el porcentaje de la población en edad escolar (0-19 años) corresponde al 16.31% de la población. Considerando que la población estimada de Ciudad Verde para el año base es de 133,604 habitantes, se obtiene una población en edad escolar de 21,791 habitantes. Por otro lado, la oferta corresponde a la capacidad de los equipamientos de educación existentes. Estos tienen una capacidad de 10,680 alumnos (3 colegios de doble jornada con capacidad de 1,440 alumnos por jornada, 1 colegio de única jornada con capacidad de 1,440 alumnos y un jardín infantil con capacidad de 600 alumnos).

Estas cifras dejan en evidencia un déficit para el año base de acceso a educación básica dentro del macroproyecto de 11,111 personas sin cobertura de educación; lo cual corresponde al 51.99% de la población en edad escolar. Esto respalda la problemática expresada por los habitantes en los grupos focales.

- **Consumo de electricidad durante la operación de las edificaciones residenciales**

El indicador tiene un valor para el año base de 1,349.36 kWh/und-año. La clasificación para Ciudad Verde puede ser analizada utilizando una segunda fuente de referencia, diferente a las utilizadas en la construcción del marco de referencia de este indicador. Para tal fin, se utilizó el anexo de indicadores de la guía metodológica del Programa de Ciudades Emergentes y Sostenibles [37], iniciativa impulsada por el Banco Interamericano de Desarrollo. Específicamente se observó el indicador de consumo anual residencial de electricidad por hogar de cota inferior y cota superior (ver Tabla 33 y Tabla 34) del apartado de eficiencia energética para la verificación.

Tabla 33. Indicador consumo anual residencial de electricidad cota inferior [37]

Indicador	Normal	Medio	Bajo
Consumo anual residencial de electricidad dividido por la cantidad de hogares (kWh/hogar-año)	1,500 – 3,500	900 – 1,500	< 900

Tabla 34. Indicador consumo anual residencial de electricidad cota superior [37]

Indicador	Normal	Medio	Bajo
Consumo anual residencial de electricidad dividido por la cantidad de hogares (kWh/hogar-año)	1,500 – 3,500	3,500 – 5,000	> 5,000

La evaluación para Ciudad Verde se ubica en la zona de rango medio de la cota inferior para un hogar típico en Latinoamérica y el Caribe, por lo que la calificación otorgada al indicador en la Tabla 32 es consistente con esta segunda fuente. Como conclusión, puede afirmarse que el consumo en Ciudad Verde presenta un ligero rezago respecto a la etiqueta normal de consumo sostenible en un contexto internacional. En este caso, podría pensarse que un bajo consumo residencial responde en la mayoría de los casos a sacrificios de bienestar y comodidad por parte de los ocupantes, en aras de disminuir el cobro por concepto de servicios públicos.

- **Consumo de gas natural durante la operación de las edificaciones residenciales**

El indicador tiene un valor para el año base de 214,52 m3/und-año. Su clasificación de “Bueno” puede ser verificada utilizando una fuente de referencia diferente a las utilizadas en la construcción del marco de referencia de este indicador. Para tal fin, se utilizó el informe de caracterización energética del sector residencial en Colombia [38]. Específicamente se empleó la matriz de caracterización energética, en su componente de gas natural, para ciudades ubicadas a más de 2000 metros sobre el nivel del mar. En la Tabla 35 se presentan los valores de referencia.

Tabla 35. Consumo promedio gas natural para ciudades ubicadas por encima de 2000 msnm [38]

Estrato	Consumo promedio (m3/año)
1	205.6
2	261.8
3	237.8

La evaluación para Ciudad Verde se encuentra entre los consumos promedio de los estratos 1 y 3. Dada la estratificación general del macroproyecto, se evidencia que el consumo presenta un grado ligero de rezago respecto a la tendencia nacional. Lo anterior, podría verse explicado por el nivel de ingresos actual de los habitantes de Ciudad Verde. Si bien las autoridades locales clasificaron el desarrollo como un proyecto urbanístico de estrato 3, en las encuestas se observó que los ingresos por hogar eran típicos de un hogar de estrato inferior. Ahora bien, este fenómeno social explicaría en parte la clasificación del indicador.

- **Carbono incorporado de las edificaciones residenciales**

Para el año base el valor del indicador es de 227.98 $kgCO_2$-eq/m^2 y se clasifica como "regular". Este valor es calculado a partir del modelo sectorial. El detalle respecto a la metodología y datos utilizados se presentan en anexos. Dentro de la literatura internacional, donde se analizan más de 100 edificaciones residenciales, este valor se ubica dentro del rango medio entre las edificaciones multifamiliares y unifamiliares. En la literatura nacional se destacan dos estudios: un análisis realizado por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) y una tesis de maestría de la Universidad Javeriana. En el primero, realizado en Cali en 2012, se incluyen todos los materiales utilizados y se encuentra un factor de emisión que oscila entre 83 y 505 $kgCO_2$-eq/m^2, dependiendo del sistema constructivo empleado [39]. En el segundo estudio, realizado en Soacha en 2018, se incluyen los materiales que hacen parte de la infraestructura, y el factor de emisiones encontrado oscila entre 177 y 218 $kgCO_2$-eq/m^2, dependiendo del sistema constructivo [40].

Ahora bien, aunque los valores de este indicador lo ubican dentro de la categoría 'regular', es importante mencionar que su valor no es muy alto y que se acerca a la clasificación 'buena'. La clasificación del indicador debe entenderse con relación a la caracterización del ambiente construido en el macroproyecto. En efecto, en Ciudad Verde las edificaciones residenciales son en su totalidad VIS y VIP y dichas viviendas cuentan con un tope de precio de venta. Esto genera, en términos generales, que no se utilicen ni desperdicien grandes cantidades de materiales durante la construcción (tanto en la estructura como en los acabados), tal y como sucedería en otras tipologías edilicias.

- **Carbono incorporado de la infraestructura urbana**

El valor del indicador es de 10.11 $kgCO_2$-eq/m^2 en el año base. Este valor es calculado a partir del modelo sectorial. No se cuenta con una clasificación preestablecida ya que la metodología de análisis es novedosa y todavía no existen valores de referencia que permitan establecer parámetros definitivos; sin embargo, se puede comparar con respecto a los tres valores presentados en una reciente investigación llamada '*Embodied carbon assessment of residential housing at urban scale'* [41]. Los resultados mencionados en este estudio internacional oscilan entre 29.9 y 30.1 $kgCO_2$-eq/m^2, por lo que el valor calculado en Ciudad Verde parecería ser bueno; no obstante, una evaluación de este indicador requiere sustentarse en una mayor cantidad de datos. Una parte importante de las emisiones incorporadas del paisajismo corresponde al área de parqueaderos, pero vale la pena destacar el hecho de que las viviendas sociales no cuentan con una proporción de parqueaderos comparable con la existente en otras tipologías edilicias. Otra posible razón para encontrar esta diferencia entre los datos reportados a nivel internacional y el de Ciudad Verde es que en los proyectos utilizados como referencia cuentan con importantes obras de estabilización de terreno.

- **Residuos generados durante la construcción de las edificaciones residenciales**

El valor del indicador es de 0.116 m^3/m^2 en el año base, y se clasifica como 'regular'. El valor obtenido no toma en consideración el material de excavación ni el de demolición, y es estimado, de manera

indirecta, a partir de estudios de vivienda social realizados en el país. El valor estimado está dentro del rango considerado como mínimamente aceptable para obtener una calificación de un punto dentro de una certificación ambiental [42]. Es importante mencionar que el índice de generación de residuos varía según el sistema constructivo utilizado. Los valores del indicador obtenidos pueden obedecer, en parte, a que en Ciudad Verde más de la mitad de las edificaciones son construidas en mampostería estructural; sistema constructivo que genera mayores volúmenes de residuos que el sistema industrializado. Adicionalmente, se debe considerar que, debido a los topes en los precios de venta de las viviendas sociales, el volumen de materiales empleados es menor que el de otras tipologías. Por otra parte, respecto a los residuos generados durante la construcción, solamente se incluyen aquellos producidos hasta el momento de entrega de las unidades habitacionales, pero no se toman en cuenta los que posteriormente se vayan a generar. Es importante mencionar que el indicador residuos producidos durante la construcción se debe complementar con el análisis de otro indicador, el de porcentaje de reutilización de residuos aprovechados, para lograr así un panorama más completo acerca del manejo de residuos en estas construcciones.

- **Porcentaje de RAP utilizado en los pavimentos**

Para el año base el valor del indicador es de 0% y se clasifica como 'muy malo'. El valor se obtiene a partir de datos suministrados por el desarrollador de la infraestructura vial del macroproyecto. La incorporación de RAP en la mezcla asfáltica tiene importantes implicaciones en la sostenibilidad de la construcción y rehabilitación de vías vehiculares ya que genera importantes ahorros de materia prima virgen que, como es el caso del bitumen, tiene una considerable huella de carbono y costos económicos significativos. Los ahorros en cemento asfáltico, agregados y en consumo energético generan beneficios ambientales para la industria. Además, la reutilización del pavimento asfáltico contribuye a que los residuos no terminen en las escombreras. En la actualidad, muchos países desarrollados reciclan e incorporan a las mezclas asfálticas crecientes volúmenes de RAP. En EEUU, la *National Asphalt Pavement Association* (NAPA) menciona que el 99% de las mezclas asfálticas recicladas son reutilizados en nuevos pavimentos [43]. Por otro lado, otros autores mencionan que en países europeos el porcentaje de RAP empleado en las mezclas asfálticas alcanza el 64% [44]. Paralelamente, las normativas en torno a la utilización de este material a nivel internacional también han ido progresando: en EEUU se permite hasta un 40%- 50% en las capas intermedias y base, y hasta un 30% en las capas superficiales [45].

- **Resultados de la evaluación comprensiva difusa**

Una vez obtenida la estimación de los 12 indicadores propuestos para este sector, se procedió a realizar la evaluación difusa de los mismos. De los 12 indicadores propuestos 11 son de tipo cuantitativo y uno de tipo cualitativo. La Figura 34 presenta el resultado de evaluación de dichos indicadores considerados por el sector Edificaciones e infraestructura urbana y se puede analizar que 7 indicadores tienen en su evaluación dos valoraciones lingüísticas indicando que dichos indicadores presentan cualidades asociadas a ambas etiquetas con diferente grado de pertenencia. Por ejemplo, el indicador "Confort térmico habitacional" tiene una evaluación de "Muy Malo", dado su mayor grado de pertenencia a esa etiqueta lingüística, con una tendencia a "Malo". Por otro lado, el indicador "Accesibilidad a edificaciones de servicio (seguridad)" presenta una evaluación de "Bueno" con una tendencia a "Regular". Adicionalmente, se puede observar que varios indicadores fueron evaluados con un 100% de pertenencia a las diferentes etiquetas lingüísticas utilizadas para la evaluación. Por ejemplo, el indicador "Porcentaje de viviendas formales en el desarrollo" pertenece en un 100% a la etiqueta "Muy Bueno", mientras que el indicador "Accesibilidad a edificaciones de servicio (salud)" pertenecen en un 100% a la etiqueta "Muy Malo", tal como se presenta en la Figura 34.

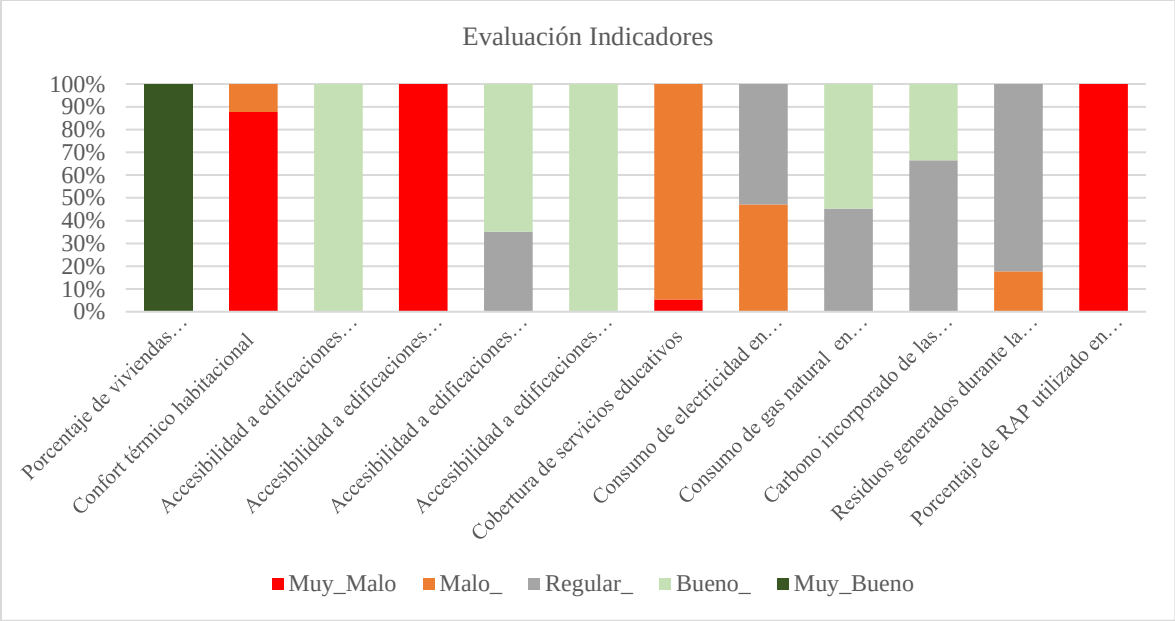


Figura 34. Evaluación de indicadores sector edificaciones e infraestructura urbana

Por otro lado, la Tabla 36 presenta la evaluación final y los grados de pertenencia asociados a cada uno de los indicadores. Es así como este sector tiene un indicador evaluado como "Muy Bueno", 4 indicadores evaluados en "Bueno", 3 indicadores evaluados como "Regular", un indicador evaluados como "Malo" y finalmente, 3 indicadores evaluados como "Muy Malo".

Tabla 36. Evaluación final de indicadores sector edificaciones e infraestructura urbana: grado de pertenencia y etiqueta lingüística

Indicador	Grado de pertenencia	Etiqueta lingüística de evaluación
Porcentaje de viviendas formales en el desarrollo	1.000	Muy Bueno
Confort térmico habitacional	1.000	Muy Malo
Accesibilidad a edificaciones de servicio (educación)	0.715	Bueno
Accesibilidad a edificaciones de servicio (salud)	1.000	Muy Malo
Accesibilidad a edificaciones de servicio (seguridad)	0.649	Bueno
Accesibilidad a edificaciones de servicio (centros comerciales)	0.789	Bueno
Cobertura de servicios educativos	0.701	Malo
Consumo de electricidad en operación edificios residenciales	0.529	Regular
Consumo de gas natural en operación edificios residenciales	0.586	Bueno
Carbono incorporado de las edificaciones residenciales	1.000	Regular
Residuos generados durante la construcción de las edificaciones residenciales	1.000	Regular
Porcentaje de RAP utilizado en los pavimentos	1.000	Muy Malo

En la Tabla 37 se presentan los pesos para cada uno de los indicadores acorde con las 5 etapas definidas por este sector y los indicadores que son considerados para la evaluación según la etapa correspondiente. Por ejemplo, la primera etapa "Ciudad con vivienda saludable" considera para su proceso de evaluación 2 indicadores, mientras que la etapa "Ciudad con acceso a infraestructura urbana" tiene asociado 7 indicadores y la etapa final "Ciudad con uso consciente de los recursos naturales" considera la totalidad de los indicadores propuestos por este sector, tal como se presenta en la Tabla 37.

Tabla 37. Pesos asignados a los indicadores según la etapa sector edificaciones e infraestructura urbana

Indicador	Etapas				
	Ciudad con vivienda segura	**Ciudad con vivienda saludable**	**Ciudad con acceso a infraestructura urbana**	**Ciudad con uso eficiente de la energía**	**Ciudad con uso consciente de los recursos naturales**
Porcentaje de viviendas formales en el desarrollo	100%	50%	25%	12.5%	8.33%
Confort térmico habitacional		50%	25%	12.5%	8.33%
Accesibilidad a edificaciones de servicio (educación)			10%	5%	3.33%
Accesibilidad a edificaciones de servicio (salud)			10%	5%	3.33%
Accesibilidad a edificaciones de servicio (seguridad)			10%	5%	3.33%
Accesibilidad a edificaciones de servicio (centros comerciales)			10%	5%	3.33%
Cobertura de servicios educativos			10%	5%	3.33%
Consumo de electricidad en operación edificios residenciales				25%	12.5%
Consumo de gas natural en operación edificios residenciales				25%	12.5%
Carbono incorporado de las edificaciones residenciales					20.83%
Residuos generados durante la construcción de las edificaciones residenciales					12.5%
Porcentaje de RAP utilizado en los pavimentos					8.33%

La evaluación final de cada una de las etapas definidas para este sector se da en un rango de 0 a 100% y los resultados son presentados en la Tabla 38. De la tabla de puede observar que la etapa “Ciudad con vivienda segura” presenta el mejor desempeño con una valoración del 100% correspondiendo a una evaluación lingüística de “Muy Bueno”. Cabe aclarar que la evaluación de dicha etapa considera únicamente el indicador “Porcentaje de viviendas formales en el desarrollo”, el cual en su estimación tuvo la misma calificación (“Muy Bueno”), ya que la ciudadela cumple con los requisitos de legalidad conforme a la normatividad urbana establecida y de seguridad en cuanto a la gestión del riesgo ante amenazas naturales y especificaciones asociadas al diseño y construcción sismo-resistente.

Por otro lado, la etapa “Ciudad con vivienda saludable” presenta el peor desempeño con un 34.376%, correspondiendo a una evaluación lingüística “Muy Malo” con un grado de pertenencia de 0.611 a esta etiqueta lingüística y una tendencia a la etiqueta “Malo” con un grado de pertenencia de 0.389. Adicionalmente, las etapas “Ciudad con acceso a infraestructura urbana”, “Ciudad con uso eficiente de la energía” y “Ciudad con uso consciente de los recursos naturales” obtuvieron una evaluación de 43.874%, 50.377% y 46.964% respectivamente. Cabe resaltar que los resultados obtenidos dependen de la definición de las funciones de pertenencia de cada una de las etiquetas lingüística utilizadas para la evaluación final de las etapas y, además de los pesos asignados a cada indicador. Por tal motivo, es importante analizar los indicadores que requieren atención prioritaria con el objetivo de mejorar el desempeño de las etapas definidas para el macroproyecto, y así lograr para este sector en específico, un proceso evolutivo para garantizar la integralidad de las construcciones.

Tabla 38. Evaluación final de las etapas sector edificaciones e infraestructura urbana

Etapa	Valoración etapa (%)	Etiquetas de evaluación				
		Muy Malo	**Malo**	**Regular**	**Bueno**	**Muy Bueno**
Ciudad con vivienda segura	**100**	0.000	0.000	0.000	0.000	**1.000**
Ciudad con vivienda saludable	**34.376**	**0.611**	0.389	0.000	0.000	0.000
Ciudad con acceso a infraestructura urbana	**43.874**	0.433	**0.567**	0.000	0.000	0.000
Ciudad con uso eficiente de la energía	**50.377**	0.000	**0.937**	0.063	0.000	0.000
Ciudad con uso consciente de los recursos naturales	**46.964**	0.155	**0.845**	0.000	0.000	0.000

Si bien la evaluación final de cada una de las etapas del sector es general, es importante desglosarla conforme a los indicadores asociados a cada una de dichas etapas. Como aspectos positivos se destaca el carácter formal del desarrollo y la proximidad de las viviendas a edificaciones de servicio como centros comerciales, colegios y puntos de seguridad. De igual forma, las emisiones de CO2 provenientes de la construcción y operación de las edificaciones son relativamente bajas para el contexto nacional o internacional. Por otra parte, no se evidencia la implementación de medidas de sostenibilidad que permitan aprovechar los RCDs de la infraestructura vial. Asimismo, los niveles de confort térmico al interior de las viviendas son deficientes, ya que no se contemplaron medidas pasivas en el diseño de las edificaciones. Por último, la proximidad de las viviendas a los equipamientos no es suficiente, ya que Ciudad Verde cuenta con problemas de cobertura en cuanto a servicios educativos y de salud.

6.2. Línea base de emisiones GEI en Ciudad Verde (2018 - 2030)

Siguiendo la metodología expuesta en el capítulo 4, se estableció la línea base de emisiones en el periodo 2018-2030 con los supuestos transversales de proyección de población y PIB que se muestran a continuación.

- **Proyección de población y stock de vivienda**

Para la evaluación del caso de estudio Ciudad Verde, desde los diferentes sectores se requiere la caracterización básica de la población, así como de la cantidad de viviendas existentes y planeadas para la vida del proyecto. Esta caracterización se establece para todo el periodo temporal sobre el que se ejecutará el análisis del proyecto; que en este caso corresponde al periodo comprendido entre los años 2018 y 2030.

Para estimar la población del proyecto Ciudad Verde se partió de la cantidad de unidades de vivienda existentes para cada año dentro del periodo de análisis. Gracias a la compañía encargada de la gestión del macroproyecto se conoció el flujo mensual de entregas de viviendas desde el año 2011 hasta los primeros meses de 2019, el total de viviendas planeadas y el año en el que se espera dar cierre al total de entregas, presentados en la Tabla 39.

Tabla 39. Estado base y total planeado de viviendas en Ciudad Verde.

Año	Unidades de vivienda
2018	37,613
2023	51,616

Fuente: Elaborado con base en información de la empresa gestora del proyecto.

De esta forma fue posible conocer la cifra para el año base del análisis (2018), y realizar una proyección de la cantidad de entregas futuras año a año hasta el 2023, para obtener así el *stock* de vivienda de Ciudad Verde en todo el periodo de análisis.

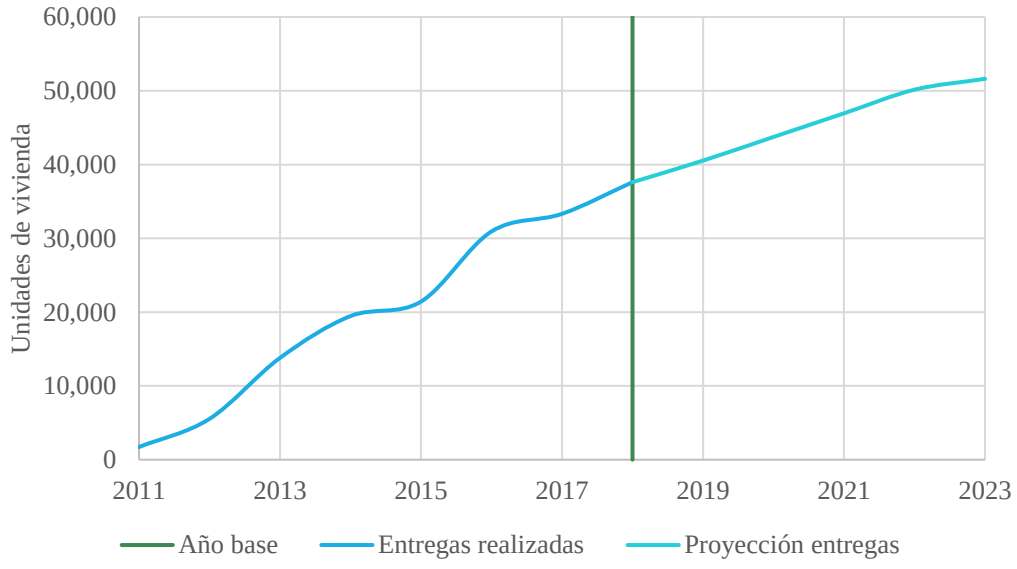


Figura 35. Stock de vivienda de Ciudad Verde.
Fuente: Elaboración propia

Una vez se obtuvo los valores de viviendas existentes para cada año del periodo de análisis, se calculó la población de Ciudad Verde como el producto entre la cantidad de viviendas y el tamaño de los hogares para cada año.

Para esto se partió de varios supuestos, inicialmente, por el tipo de unidad habitacional que corresponde la vivienda horizontal, se consideró que en cada vivienda habita únicamente un hogar. Además, el número de habitantes de Ciudad Verde se proyectó con base en la población y el tamaño promedio del hogar para el año 2018 determinados mediante la encuesta (capítulo 5) y teniendo en cuenta el fenómeno de transición demográfica en el que anualmente disminuye la cantidad de habitantes por hogar, según la proyección del plan energético nacional 2020 – 2050 (reducción del tamaño del hogar de 1.37% por año en el periodo 2020 – 2030) [46].

La proyección de población obtenida del cálculo para cada año, considerando el efecto de la transición demográfica se ilustra en la Figura 36. Adicionalmente, los resultados del *stock* de vivienda, tamaño del hogar y población se resumen en la Tabla 40, para los años principales del periodo de estudio.

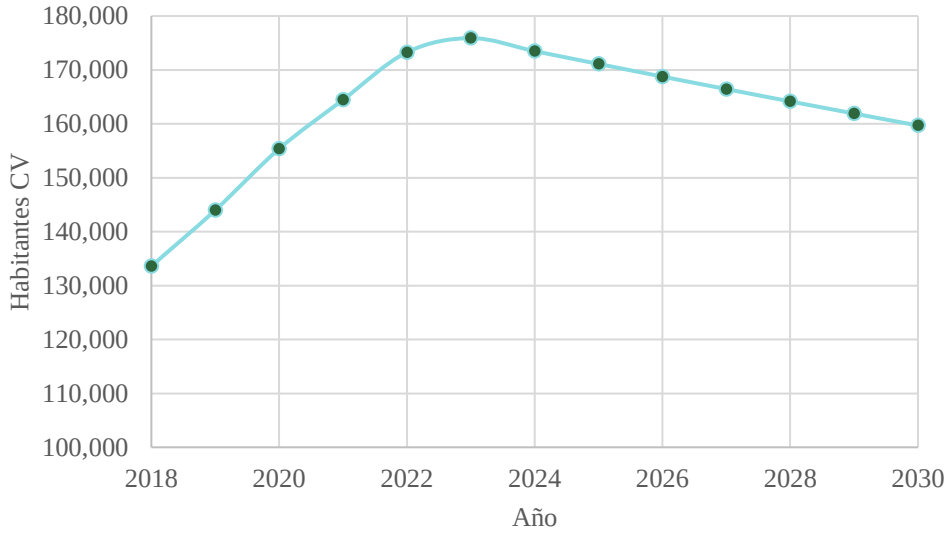


Figura 36. Proyección de población de Ciudad Verde.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 40. Valores proyección de viviendas y habitantes

Año	2018	2019	2023	2030
Unidades de vivienda	37,613	40,535	51,616	51,616
Tamaño del hogar	3.55	3.55	3.41	3.09
Habitantes	133,604	143,983	175,900	159,686

- **Proyección del PIB**

Respecto a los supuestos económicos para el análisis sectorial de Ciudad Verde, se consideró el escenario de crecimiento económico definido en el marco fiscal de mediano plazo [47] para proyectar la variación del PIB del país y el valor de PIB per cápita en el periodo entre 2018 y 2030, como se muestra en la tabla a continuación.

Tabla 41. Proyección del PIB

Año	Crecimiento PIB [47]	PIB (Miles millones USD)	Población	PIB/pc (Millones USD)
2018	2.60%	**$ 383.18**	48,258,494	$ 0.0079
2019	3.60%	**$ 396.98**	48,698,399	$ 0.0082
2020	4.00%	**$ 412.85**	49,142,315	$ 0.0084
2021	4.20%	**$ 430.19**	49,590,276	$ 0.0087
2022	4.40%	**$ 449.12**	50,042,322	$ 0.0090
2023	4.30%	**$ 468.44**	50,498,488	$ 0.0093
2024	4.30%	**$ 488.58**	50,958,812	$ 0.0096
2025	4.30%	**$ 509.59**	51,423,332	$ 0.0099
2026	4.10%	**$ 530.48**	51,892,087	$ 0.0102
2027	4.00%	**$ 551.70**	52,365,114	$ 0.0105
2028	4.00%	**$ 573.77**	52,842,454	$ 0.0109
2029	4.00%	**$ 596.72**	53,324,145	$ 0.0112
2030	4.00%	**$ 620.59**	53,810,226	$ 0.0115

En las siguientes secciones se presentan los análisis para cada uno de los sectores considerados en este estudio y el análisis integrado de la línea base de los sectores.

6.2.1. Ecología urbana

Para el sector de ecología urbana, no se tienen en cuenta emisiones relacionadas sino la captura y almacenamiento de CO_2 en suelo y biomasa aérea. El carbono almacenado en suelo se estima con base en la información obtenida del desarrollador del proyecto, en la que se identifica que en total Ciudad verde cuenta con 151.75 ha de área verde, según el Nivel 1 del IPCC [48] y siguiendo la ecuación 2.25. del capítulo 2, del Volumen 4 del IPCC 2006 [3].

Para la selección de los valores de referencia (SOC_{REF}) de existencias de C orgánico en suelo, se determinó la textura del suelo, de acuerdo al mapa de textura de suelos del municipio de Soacha, del cual se identifica que esta es franco arenosa [1]. De la tabla 2.3 del capítulo 4 de las directrices IPCC 2019 [49] se tiene el valor de referencia SOC_{REF} = 52 tC ha^{-1}, que con la aplicación de los factores F_{LU}, F_{MG} y F_I y relación CO_2/C resulta en un total de 191 y 200 tCO_2 ha^{-1} para las categorías de cobertura arbórea y de pastos respectivamente. Como resultado del análisis de imágenes satelitales, se determinó que para 2018, 145.6 ha corresponden a pastos y 6.15 ha a cobertura forestal (eucaliptos) por lo tanto las existencias de CO_2 total en el suelo de Ciudad Verde se estiman en 29,547.75 tCO_2.

Existencias de carbono en biomasa aérea y subterránea

La estimación de carbono almacenado en biomasa aérea y subterránea se abordó únicamente para la cobertura forestal. De acuerdo a las estimaciones realizadas establecido por el IPCC [3][4], esta cobertura almacena 129.4 y 39.94 tCO_2 ha^{-1}, en biomasa aérea y subterránea respectivamente es decir en total las 6.15 ha de esta cobertura almacenan 1,041.4 tCO_2.

6.2.2. Manejo integrado del agua

Para la cuantificación de las emisiones entre el 2018 y el 2030 se incluyeron las emisiones de $CO_{2\text{-eq}}$ asociadas al suministro de agua potable y al manejo de la escorrentía y las aguas residuales. La Figura 37 presenta las fuentes y los gases de efecto invernadero considerados en el inventario de emisiones, para las etapas de construcción y operación.

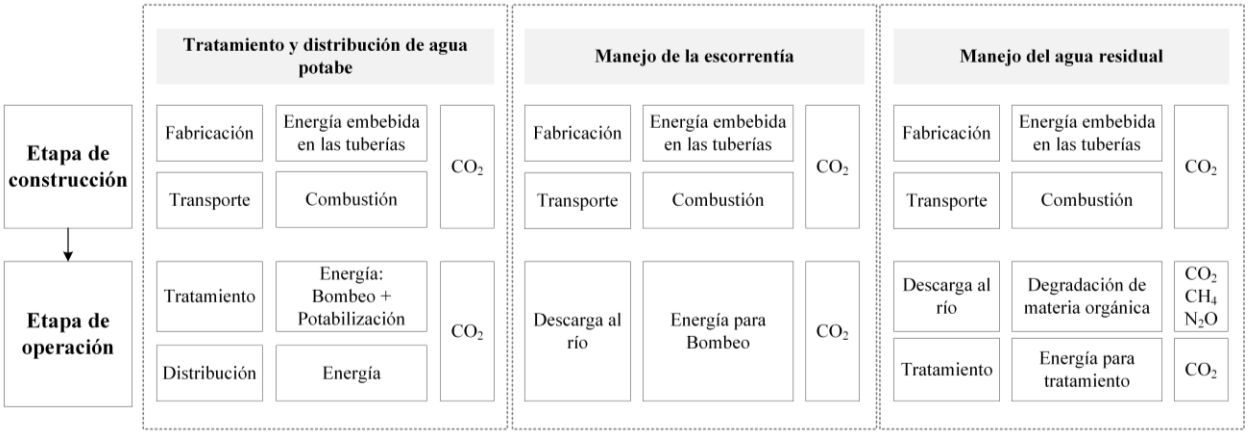


Figura 37. Límites del sistema para la estimación de las emisiones de GEI

En primer lugar, se realizó la cuantificación de las emisiones asociadas al suministro de agua potable. En Ciudad Verde, el agua proviene del Sistema Chingaza, que se surte desde el Embalse de Chuza. Mediante un sistema de túneles, el agua es conducida hasta la PTAP Wiesner y, posterior al proceso de potabilización, se direcciona al tanque de almacenamiento Cazucá. El abastecimiento se realiza por gravedad desde dicho tanque hacia Ciudad Verde. Teniendo en cuenta lo mencionado, se incluyeron las emisiones relacionadas con la fabricación, transporte e instalación de las tuberías que componen el sistema de distribución, las asociadas al bombeo del agua desde la fuente de captación hasta PTAP Wiesner y las vinculadas al consumo de energía para potabilizar el agua. Estas se calcularon mediante la Ecuación 8, la Ecuación 9 y la Ecuación 10. Particularmente, las emisiones provenientes de la fabricación e instalación de las tuberías se anualizaron a partir de su vida útil y se sumó la fracción correspondiente al inventario de emisiones de cada año. Estas emisiones se incluyeron para no subestimar el total de emisiones asociadas al manejo del agua, pues el periodo de tiempo analizado no incluye el año de construcción del sistema de distribución.

$$E_{F\&I1} = \sum F_k^{CO_2} * W_k \quad \text{o} \quad E_{F\&I} = \sum F_m^{CO_2} * L_m \qquad 8$$

$$E_{b1} = F_j^{CO_2} * FE_j^{elec} * Q_j \qquad 9$$

$$E_{p1} = F_i^{CO_2} * FE_i^{elec} * Q_i \qquad 10$$

Donde $E_{F\&I1} =$ Emisiones asociadas a la fabricación e instalación de las tuberías que componen el sistema de distribución (kg $CO_{2\text{-eq}}$/año), $F_k^{CO_2} =$ Factor de emisión de $CO_{2\text{-eq}}$ de cada material por peso de la tubería (kg $CO_{2\text{-eq}}$/kg), $W_k =$ Peso de la tubería (kg), $L_m =$ Longitud de la tubería (m), $F_m^{CO_2} =$ Factor de emisión de $CO_{2\text{-eq}}$ de cada material por longitud de la tubería (kg $CO_{2\text{-eq}}$/m), $E_{b1} =$ Emisiones asociadas al bombeo del agua desde la fuente de captación hasta la PTAP (kg $CO_{2\text{-eq}}$/año), $F_j^{CO_2} =$ Factor de emisión por huella de carbono relacionado con el consumo de energía eléctrica (kg $CO_{2\text{-eq}}$ /kWh), $FE_j^{elec} =$ Factor de consumo de energía eléctrica por m^3 de agua bombeada hasta la PTAP (kWh/m^3), $Q_j =$ Caudal bombeado (m^3/año), $E_{p1} =$ Emisiones asociadas al consumo de energía para potabilizar el agua (kg $CO_{2\text{-eq}}$/año), $F_i^{CO_2} =$ Factor de emisión por huella de carbono relacionado con el consumo de energía eléctrica (kg $CO_{2\text{-eq}}$ /kWh), $FE_i^{elec} =$ Factor de consumo de energía eléctrica por m^3 de agua potabilizada (kWh/m^3) y $Q_i =$ Caudal de agua potabilizado (m^3/año).

Los factores de emisión por huella de carbono y los factores de conversión utilizados para la cuantificación de las emisiones se presentan en la Tabla 42 y en la Tabla 43. Particularmente, para el

acero se realizó una aproximación de las emisiones asociadas al transporte de las tuberías de concreto sin refuerzo y reforzado entre el lugar de producción y la obra ya que el factor empleado no incluye la cuantificación de dichas emisiones. De esta forma, para el cálculo se utilizaron vehículos de carga diésel con capacidad de 6 m^3 [50], una distancia de recorrido de 11 km/viaje y un factor de emisión de 0.60 kg CO_2/km [51].

Respecto al cálculo del agua potabilizada, se incluyó el consumo de agua potable residencial, comercial e institucional. El consumo residencial se estimó a partir de la información de agua facturada a cada usuario de Ciudad Verde, la cual fue suministrada por la EAB-ESP. Adicionalmente, a partir de esta información, se estableció un crecimiento proyectado para el periodo de análisis considerando los promedios de los últimos tres periodos reportados. El consumo comercial e institucional se evaluó a partir de la metodología propuesta en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), debido a que no se tenía información primaria de dicho consumo [52]. Se utilizó un valor de pérdidas de agua en el sistema de distribución del 39%, correspondiente al valor calculado para Bogotá a partir de la información reportada en el Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios (SUI) [53], [54]. Adicionalmente, se asumió un aumento del 1% anual en el consumo residencial con base a un análisis realizado del consumo de agua potable de los últimos años.

Tabla 42. Factores de emisión de CO2-eq asociados a cada material

Material de la tubería	**Factor**		**Fuente**
Cloruro de Polivinilo (PVC)	2.36 kg $CO_{2\text{-eq}}$/kg		Venkatesh et al. [55]
Acero	2.69 kg $CO_{2\text{-eq}}$/kg		ECOINGENIERÍA S.A.S [56]
Tubería reforzada con cilindro de acero y varilla revestida en el interior y exterior en concreto (CCP)	Diámetro = 304.8 mm	1.89 kg $CO_{2\text{-eq}}$/kg	Kaushik et al. [57]
	Diámetro = 406.4 mm	2.09 kg $CO_{2\text{-eq}}$/kg	
	Diámetro = 508.0 mm	2.31 kg $CO_{2\text{-eq}}$/kg	
	Diámetro = 609.6 mm	2.55 kg $CO_{2\text{-eq}}$/kg	

Tabla 43. Factores de emisión y conversión - distribución de agua potable

Factor	**Valor**	**Fuente**
Emisión por huella de carbono por consumo de energía eléctrica	0.21 kg $CO_{2\text{-eq}}$ /kWh	UPME [58]
Consumo de energía eléctrica por m^3 de agua bombeada	2.54 kWh/m^3	EAB-ESP [59]
Consumo de energía eléctrica por m^3 de agua tratada en la PTAP	0.082 kWh/m^3	EAB-ESP [59]

En segundo lugar, se incluyeron las emisiones de $CO_{2\text{-eq}}$ asociadas al manejo de la escorrentía. Estas corresponden a las emisiones por la fabricación e instalación de las tuberías y los canales que componen el sistema de drenaje pluvial y a las emisiones por el bombeo de la escorrentía al Río Tunjuelo. Dichas emisiones se calcularon mediante la Ecuación 11 y la Ecuación 12. Específicamente, las emisiones provenientes de la fabricación e instalación de las tuberías y los canales se anualizaron a partir de su vida útil y se sumó la fracción correspondiente al inventario de emisiones de cada año. Estas emisiones se incluyeron para no subestimar el total de emisiones asociadas al manejo del agua, pues el periodo de tiempo analizado no incluye el año de construcción del sistema de drenaje pluvial.

$$E_{F\&I2} = \sum F_p^{CO_2} * W_p \quad \text{o} \quad E_{F\&I} = \sum F_q^{CO_2} * L_q \qquad 11$$

$$E_{b2} = F_n^{CO_2} * FE_n^{elec} * Q_n \qquad 12$$

Donde $E_{F\&I2} =$ Emisiones asociadas a la fabricación e instalación de las tuberías y los canales que componen el sistema de drenaje pluvial (kg $CO_{2\text{-eq}}$/año), $F_p^{CO_2} =$ Factor de emisión de $CO_{2\text{-eq}}$ de cada material por peso de la tubería (kg $CO_{2\text{-eq}}$/kg), $W_p =$ Peso de la tubería (kg), $L_q =$ Longitud de la tubería (m), $F_q^{CO_2} =$ Factor de emisión de $CO_{2\text{-eq}}$ de cada material por longitud de la tubería (kg $CO_{2\text{-eq}}$/m), $E_{b2} =$

Emisiones asociadas al bombeo de escorrentía desde el pondaje hacia el Río Tunjuelo (kg $CO_{2\text{-eq}}$/año), $F_n^{CO_2}$ = Factor de emisión por huella de carbono relacionado con el consumo de energía eléctrica (kg $CO_{2\text{-eq}}$ /kWh), FE_n^{elec} = Factor de consumo de energía eléctrica por m^3 de escorrentía bombeada hasta el Río Tunjuelo (kWh/m^3) y Q_i = Caudal de escorrentía bombeado (m^3/año).

Los factores de emisión por huella de carbono utilizados se presentan en la Tabla 44. Específicamente, para el concreto se realizó una estimación de las emisiones asociadas al transporte de las tuberías ya que el factor empleado no incluye la cuantificación de dichas emisiones. De esta manera, para el cálculo se utilizaron vehículos de carga diésel con capacidad de 6 m^3 [50], una distancia de recorrido de 14.3 km/viaje y un factor de emisión de 0.60 kg CO_2/km [51]. Es importante mencionar que se podrían incluir las emisiones asociadas a la degradación de los diferentes contaminantes presentes en la escorrentía por su vertimiento a los cuerpos de agua residual si tratamiento. En este caso, no se consideraron dichas emisiones pues no se tenía información de las cargas contaminantes en la escorrentía.

Por otro lado, para calcular la energía requerida para el bombeo de la escorrentía se utilizó información de las características del pondaje húmedo y de la estación elevadora, la cual fue proporcionada por la EAB-ESP. Así pues, el pondaje posee una capacidad de almacenamiento efectivo de 28000 m^3 con una lámina de agua de 1 metro. La potencia requerida para la operación de la estación de bombeo es de 1200 HP y su capacidad de 4 m^3/s. A partir de los valores mencionados, se estimó la energía consumida por m^3 de agua bombeada, pues no se tiene información de las curvas de las bombas.

Tabla 44. Factores de emisión de CO2-eq asociados a cada material

Material de la tubería	Factor (kg $CO_{2\text{-eq}}$/kg)	Fuente
Concreto sin refuerzo	0.67	Cadena et al. [50]
PVC	3.23	Kyung et al. [60]
Concreto reforzado	0.67	Cadena et al. [50]

Por último, se consideraron las emisiones de $CO_{2\text{-eq}}$ asociadas al manejo de las aguas residuales, las cuales están representadas por la fabricación, transporte e instalación de las tuberías que componen el sistema de drenaje sanitario, así como el vertimiento y el tratamiento del agua. Las emisiones asociadas a la fabricación, transporte e instalación de las tuberías se cuantificaron mediante la Ecuación 13. Estas emisiones se incluyeron para no subestimar el total de emisiones asociadas al manejo del agua, pues el periodo de tiempo analizado no incluye el año de construcción del sistema de drenaje sanitario. Por otro lado, los factores de emisión por huella de carbono utilizados se presentan en la Tabla 45.

$$E_{F\&I3} = \sum F_v^{CO_2} * W_v \quad \text{o} \quad E_{F\&I} = \sum F_w^{CO_2} * L_w \qquad 13$$

Donde $E_{F\&I3}$ = Emisiones asociadas a la fabricación e instalación de las tuberías que componen el sistema de drenaje sanitario (kg $CO_{2\text{-eq}}$/año), $F_v^{CO_2}$ = Factor de emisión de $CO_{2\text{-eq}}$ de cada material por peso de la tubería (kg $CO_{2\text{-eq}}$/kg), W_w = Peso de la tubería (kg), L_w = Longitud de la tubería (m) y $F_w^{CO_2}$ = Factor de emisión de $CO_{2\text{-eq}}$ de cada material por longitud de la tubería (kg $CO_{2\text{-eq}}$/m).

Tabla 45. Factores de emisión de CO2-eq asociados a cada material

Material de la tubería	Factor		Fuente
Concreto sin refuerzo	0.67 kg $CO_{2\text{-eq}}$/kg		Cadena et al. [50]
PVC	3.23 kg $CO_{2\text{-eq}}$/kg		Kyung et al. [60]
Concreto reforzado	0.67 kg $CO_{2\text{-eq}}$/kg		Cadena et al. [50]
Poliéster reforzado con fibra de vidrio (FRP)	Diámetro = 0.8 m	1.75 kg $CO_{2\text{-eq}}$/kg	Vahidi et al. [61]
	Diámetro = 1.4 m	3.06 kg $CO_{2\text{-eq}}$/kg	

Adicionalmente, se incluyeron las emisiones de $CO_{2\text{-eq}}$ relacionadas con el vertimiento de aguas residuales no tratadas al Río Bogotá. Para este fin, se utilizó la metodología propuesta por el IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero [62]. En este caso, las emisiones de $CO_{2\text{-eq}}$ involucraron las emisiones de N_2O que provienen de la descarga de aguas residuales no tratadas a cuerpos de agua receptores. Los coeficientes utilizados para su cuantificación se presentan en la Tabla 46. Particularmente, se utilizó un valor de T_{ij} de 0.0 a partir del 2026, ya que para ese año se tiene proyectado el inició de operación de la PTAR Canoas, la cual tratará el 100% de las aguas residuales generadas en Ciudad Verde [63].

Tabla 46. Factores para la cuantificación de las emisiones de N2O asociadas al vertimiento de agua residual sin tratar

Material de la tubería	Factor		Fuente
Factor de emisión para la descarga de agua residual sin tratamiento (EF_J)	0.019 kg N_2O/kg N		IPCC [62]
Fracción de agua residual descargada sin tratamiento (T_{ij})	2018 - 2025	1.0	(-)
	2026 – 2030	0.0	
Consumo anual de proteína per cápita	0.92 kg proteína/persona/año		IPCC [62]
Fracción de nitrógeno en la proteína (F_{NRP})	0.16 kg N/kg proteína		IPCC [62]
Nitrógeno adicional de productos domésticos agregados a las aguas residuales (N_{HH})	1.17		IPCC [62]
Factor de nitrógeno en la proteína no consumida dispuesta en el sistema de alcantarillado ($F_{NON\text{-}CON}$)	1.04 kg N/kg N		IPCC [62]
Factor para la proteína proveniente de usos industriales y comerciales descargada en el sistema de alcantarillado ($F_{IND\text{-}COM}$)	1 kg N/kg N		IPCC [62]

Para el periodo de tiempo del 2026 al 2030, se incluyeron las emisiones asociadas al tratamiento de las aguas residuales por parte de la PTAR Canoas. Entre éstas se encuentran las emisiones por el uso de energía en la PTAR, las cuales calculan mediante la Ecuación 14. Los factores de conversión utilizados para este fin se presentan en la Tabla 47.

$$E_{b3} = F_s^{CO_2} * FE_s^{elec} * Q_s \qquad 14$$

Donde $E_{b2} =$ Emisiones por el uso de energía en la PTAR Canoas (kg $CO_{2\text{-eq}}$/año), $F_n^{CO_2} =$ Factor de emisión por huella de carbono relacionado con el consumo de energía eléctrica (kg $CO_{2\text{-eq}}$ /kWh), $FE_n^{elec} =$ Factor de consumo de energía eléctrica por m^3 de agua tratada (kWh/m^3) y $Q_i =$ Caudal de agua residual tratado (m^3/año).

Tabla 47. Factores de emisión y conversión - tratamiento de agua residual

Factor	Valor	Fuente
Emisión por huella de carbono por consumo de energía eléctrica	0.21 kg $CO_{2\text{-eq}}$ /kWh	UPME [58]
Consumo de energía eléctrica por m^3 de agua residual tratada	0.0621 kWh/m^3	EAB-ESP [64]

De igual modo, se incluyeron las emisiones que se generan de los procesos de tratamiento, que están representadas por emisiones de N_2O y CH_4. Para su cuantificación se utilizó la metodología propuesta por el IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero [62]. En su primera etapa, dicha planta tendrá tratamiento preliminar y primario químicamente asistido (i.e. sedimentación)[65]. Los coeficientes utilizados para la cuantificación de las emisiones se presentan en la Tabla 46 y la Tabla 48. Respecto al factor de generación de lodos, este se cuantificó a partir de la información disponible para la PTAR Salitre. Se asumió que, debido a que la PTAR Canoas tendrá un tratamiento equivalente al sistema dispuesto en la PTAR Salitre, la producción de lodos por metro cubico de agua tratado será similar. A su vez, en el cálculo de las aguas residuales generadas en Ciudad Verde se incluyó el agua residual proveniente de zonas residenciales, comerciales e institucionales. Esta cuantificación se realizó a partir de

la metodología planteada en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), debido a que no se contaba con información primaria de la generación de agua residual [11]. En relación a los factores para la conversión de las emisiones a $CO_{2\text{-eq}}$, se utilizaron valores de 21 y 310 para CH_4 y N_2O, respectivamente [66].

Tabla 48. Factores para la cuantificación de las emisiones de N2O y CH4 asociadas al tratamiento de las aguas residuales

Material de la tubería	Factor	Fuente
Fracción (U_i)	1.0	(-)
Fracción de agua residual tratada (T_{ij})	1.0	(-)
Factor de generación de lodos	0.0001015 toneladas/m^3 agua tratada	EAB-ESP [64]
Máxima capacidad de producción de CH_4 (B_o)	0.6 kg CH_4/kg DBO	IPCC [62]
Factor de corrección (MCF_j)	0.035	IPCC [62]
Factor de emisión para el sistema de tratamiento - CH_4 (EF_j)	0.21 kg CH_4/kg DBO	IPCC [62]
Factor de emisión para el sistema de tratamiento - N_2O (EF_j)	0.016 kg N_2O/kg N	IPCC [62]
Cantidad de CH_4 recuperado o quemado en el sistema de tratamiento (R_j)	0 kg CH_4/año	IPCC [62]

Los resultados obtenidos para las emisiones de $CO_{2\text{-eq}}$ se presentan en la Figura 38. Respecto a las emisiones asociadas al suministro de agua potable, se observa que estas aumentan hasta el 2025 y, posterior a este año, se estabilizan. Esto se presenta debido a que, a pesar de que se asumió un incremento en el consumo de agua potable cada año, desde el 2025 se proyectó una disminución de la población en Ciudad Verde debido a la reducción esperada del número de personas por hogar en Bogotá [67]. Del total de las emisiones generadas por el suministro de agua potable, un gran porcentaje está asociado al uso de energía para el bombeo y la potabilización del agua. La pérdida de agua mediante fugas y/o rupturas de las tuberías genera un aumento en las emisiones ya que se debe distribuir mayor cantidad de agua para satisfacer la demanda de la población.

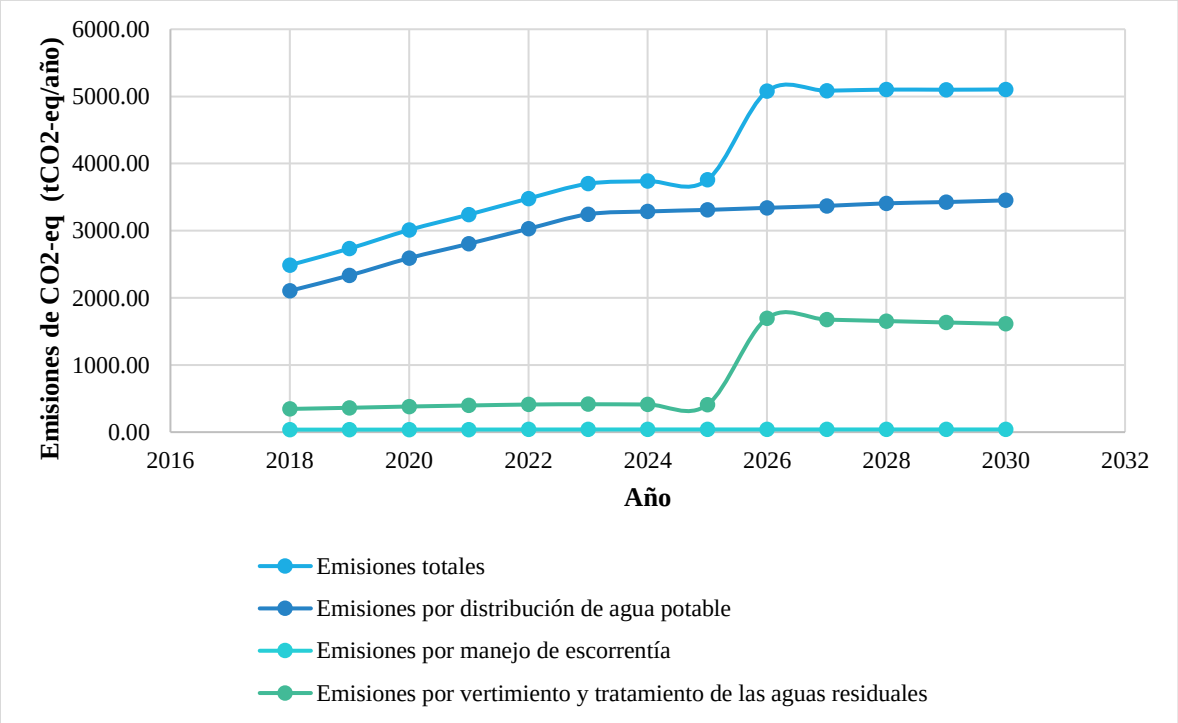


Figura 38. Emisiones de CO2-eq para la línea base

Acerca de las emisiones asociadas al manejo de la escorrentía, se observa un aumento de estas a lo largo de los años. En la actualidad, algunos de los terrenos no han sido desarrollados, por lo que hacen parte de las áreas permeables de Ciudad Verde. Dado que se tiene planeado urbanizar algunos de estos terrenos en el futuro, se generará un incremento en las zonas impermeables y, por lo tanto, en el volumen de escorrentía producida y bombeada. Esto explica el aumento en las proyecciones de las emisiones de GEI. En relación con las emisiones asociadas con el vertimiento y tratamiento de las aguas residuales, se observa un aumento de éstas desde el 2026. Esto se genera debido al inicio de operaciones de la PTAR Canoas. Las emisiones asociadas al tratamiento de las aguas residuales son mayores a las emisiones generadas por el vertimiento de las aguas residuales a causa de la energía utilizada en el tratamiento y el aumento de las emisiones de CH_4 por la generación de lodos. Del total de emisiones cuantificadas, se observa que la mayoría están representadas por la distribución de agua potable (Ver Tabla 49) mientras que el manejo de la escorrentía posee la menor contribución a la generación de emisiones de GEI.

Tabla 49. Distribución de las emisiones en las áreas del manejo integrado del agua

Área	**Año**	
	2018	**2030**
Distribución de agua potable	84.61%	67.63%
Manejo de la escorrentía	1.50%	0.78%
Manejo de las aguas residuales	13.89%	31.59%

La Figura 39 presenta las emisiones de GEI por habitante de ciudad verde y por metro cúbico de agua. En promedio, se emiten 0.019 $tCO_{2\text{-eq}}$ por persona y 0.00074 $tCO_{2\text{-eq}}$ por m^3 de agua manejada, en el periodo de tiempo analizado. En comparación con las emisiones reportadas en otros países, las emisiones asociadas a la gestión del agua son menores. Por ejemplo, en México se reportó un valor de 0.00166 $tCO_{2\text{-eq}}/m^3$ de agua manejada [68]. Particularmente, en Ciudad Verde se emiten 0.018 $tCO_{2\text{-eq}}$ por persona debido al suministro de agua potable, el cual difiere y es menor en relación con los valores reportados en otros países. Se han obtenido valores de 0.0254, 0.0769 y 0.0235 $tCO_{2\text{-eq}}$/persona/año para China, Estados Unidos y Canadá [69]. Es importante aclarar que estos valores no son directamente comparables pues en cada estudio se realizan suposiciones particulares para el cálculo de las emisiones y las fuentes de energía en cada país presentan una huella de carbono diferente.

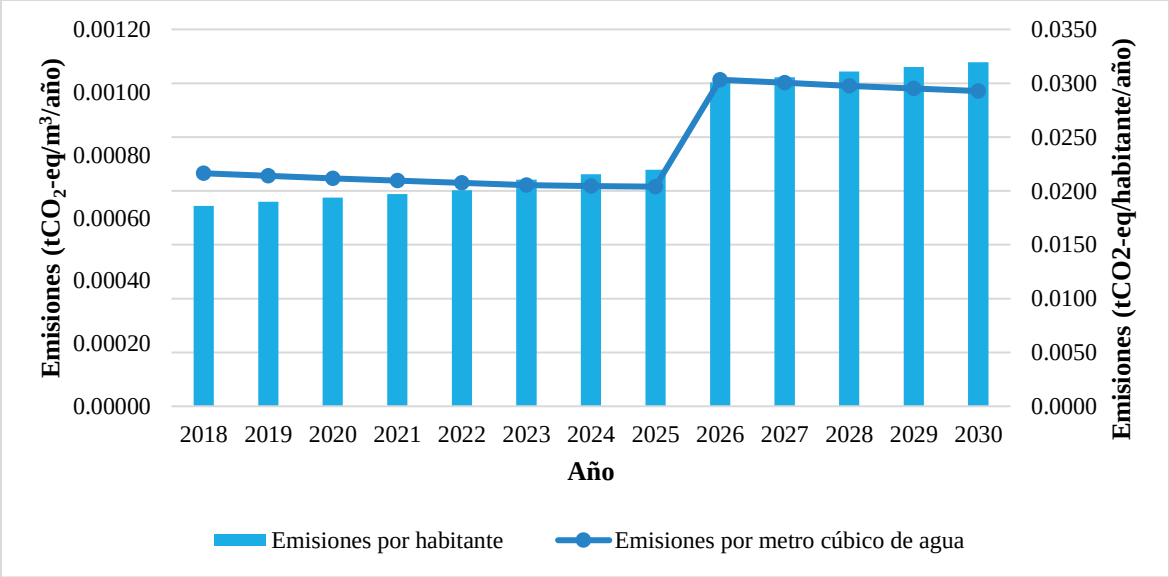


Figura 39. Emisiones de CO2-eq por habitante y por metro cúbico de agua para la línea base

La mitigación de los GEI en la gestión del agua urbana en Ciudad Verde puede estar enfocada a la reducción de las fugas en el sistema de distribución de agua y/o la reducción en el consumo de agua potable mediante el uso de equipos ahorradores y sistemas de reciclaje de aguas grises y aprovechamiento de aguas lluvias, si es posible. Así mismo, en el manejo de la escorrentía en la fuente mediante SUDS para disminuir los costos operativos del sistema de drenaje, el uso de energía en el bombeo del agua y aumentar la captura de carbono por la presencia de vegetación. Por último, en el diseño e instalación de PTARs de un tamaño y ubicación adecuadas, y en la recuperación de energía en el tratamiento de los lodos generados en las plantas.

6.2.3. Suministro y uso de energía

La línea base de emisiones por parte del sector energía está caracterizada por las emisiones indirectas causadas por el consumo de electricidad en el parque lumínico. Las suposiciones para determinar la línea base del alumbrado público son las siguientes:

- El parque lumínico de la Ciudadela se mantuvo igual entre enero de 2018 a noviembre de 2019.
- El parque lumínico de la Ciudadela se mantendrá estático a lo largo del horizonte de análisis. Esto debido a que se considera que gran parte del sistema de alumbrado público está construido. Se identificaron pocos lotes que están por construir o se encuentran en construcción que no cuentan con postes de alumbrado en su perímetro.
- Las luminarias a reemplazar por cumplimiento de vida útil o mantenimiento mantendrán su tecnología a lo largo del horizonte de análisis y la misma potencia nominal.
- La tecnología de las luminarias es la misma a lo largo de la Ciudadela. Esta suposición se valida al considerar que el parque lumínico a 2016 en la ciudad de Soacha estaba comprendido en un 98.38% de luminarias de sodio y esta tecnología es considerada el estándar para iluminación pública.
- El consumo energético del fotocontrol que viene integrado en la luminaria es despreciable, por lo que no será contabilizado.
- El sistema de distribución de la Ciudadela no tiene perdidas.
- La duración de encendido diario del parque lumínico es uniforme a lo largo de las luminarias durante todo el año, y se toma como 12 horas al día.
- El factor de emisión de energía eléctrica del SIN es constante a lo largo del horizonte de análisis.

Estas suposiciones implicarán que el perfil de consumo energético del parque se mantiene constante a lo largo del horizonte de análisis para esta línea base. Lo anterior debido a que no se cuenta con información acerca de planes de expansión del sistema de alumbrado público para Ciudad Verde, en cuanto a construir postes en lotes por construir y que aún no cuentan con iluminación y para complementar infraestructura actual. A su vez no se cuenta con información acerca del reemplazo o *retrofit* del sistema de alumbrado actual en cuanto al reemplazo de luminarias por tecnologías más eficientes como LED. La única información sobre implementación de este tipo de acciones en Soacha se encuentra en el Plan Anual de Alumbrado Público de 2016, en el cual se proyectaba que para dicho año se implementarían 1375 para la expansión del sistema de alumbrado, dentro de las cuales 786 son de tecnología LED a ser instalados en proyectos urbanísticos.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la Figura se presentan los resultados de la línea base de emisiones por alumbrado público, la cual deberá ser ajustada teniendo en cuenta lo considerado anteriormente. Esta línea base a su vez deberá ser complementada con el consumo de edificaciones de carácter no residencial en Ciudad Verde (centros comercial y equipamientos), el cual será un esfuerzo conjunto con el sector de edificaciones.

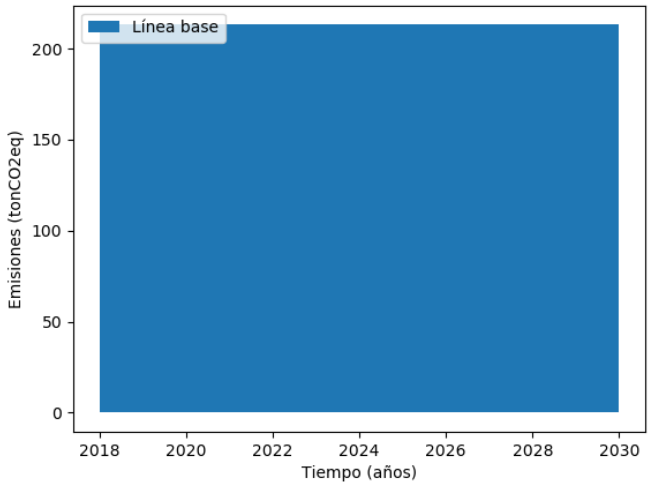


Figura 40. Emisiones indirectas de GEI por consumo de energía en alumbrado público.

6.2.4. Gestión de residuos

De acuerdo con los lineamientos del IPCC para inventarios nacionales de GEI en el sector de residuos [70], las prácticas en el sector incluyen la recolección, el reciclaje, la disposición final de residuos, aprovechamientos biológicos y otro tipo de tratamientos como la incineración y la quema a cielo. Aunque el reciclaje modifica la cantidad de residuos que son dispuestos o sometidos a otro tipo de tratamientos, el cambio en las emisiones de GEI atribuidas al reciclaje es cuantificado por otros sectores, por lo que no se evalúan en el presente análisis. De este modo, para el inventario de GEI generados por los residuos del macroproyecto de vivienda Ciudad Verde (CV), se tuvo en cuenta exclusivamente las emisiones atribuidas a la disposición en relleno sanitario (alternativa de gestión predominante para los residuos generados en CV) y las emisiones resultantes de la recolección y transporte de los residuos.

- **Línea base de generación de residuos en ciudad verde**

Para la cuantificación de la línea base de emisiones se asumió que la generación de residuos per cápita cambia cada año del horizonte de análisis de acuerdo con las proyecciones de PIB para el país. La estimación del cambio en la generación de residuos domiciliarios con relación al PIB, se realizó utilizando datos de PIB y producción per cápita de residuos (PPC) para 26 países con diferente nivel de ingreso económico (ver Anexo 5). De igual forma, la composición de los residuos generados también varía con el cambio en factores económicos como el PIB. Se observa que los países con ingresos bajos poseen una mayor fracción de residuos orgánicos, mientras que en países de ingreso alto, predominan los materiales no putrescibles como papel y plástico [27]. Dado que los residuos domiciliarios generados en el municipio de Soacha presentan una composición de materia orgánica (31.9%) cercana a los países de alto ingreso (i.e. países de la OCDE) y una fracción elevada de plástico (33.8%) y papel y cartón (15.6%), se asumirá que la composición de los residuos generados en Ciudad Verde no cambiará durante el horizonte de la línea base. La estimación de la línea base se realizó teniendo en cuenta cuatro tipos predominantes de residuos generados y recolectados en Ciudad Verde: residuos domiciliarios, residuos de barrido, residuos de poda y corte de césped y residuos de construcción y demolición (RCD) en la etapa de construcción del proyecto.

- **Residuos domiciliarios**

La cantidad de residuos domiciliarios en 2018 se cuantificó a partir de la producción de residuos per cápita estimada en el PGIRS del municipio de Soacha para el año 2015 (0.548 kg/hab/día) [24],

asumiendo que para el año base no hubo cambios significativos en la cantidad de residuos generados por habitante y que generación de residuos del municipio era representativa para los habitantes de Ciudad Verde. La composición de los residuos domiciliarios generados se obtuvo igualmente del PGIRS del municipio.

Tabla 50. Composición física porcentual residuos domiciliarios de Soacha. Tomado de [24]

Tipo de material	Residuos viviendas (% Peso Base Húmeda)
Cartón	8.58
Caucho	0.05
Cenizas	0.00
Cerámica	0.38
Cuero	0.67
Hueso	0.00
Ladrillo	0.09
Madera	0.71
Materia orgánica putrescible	31.87
Metales	2.97
Minerales	0.00
Otros	2.60
Papel	7.00
Plástico	33.78
Textil	6.79
Vidrio	4.52

- **Residuos de barrido**

La cantidad de residuos de barrido que son generados por el municipio de Soacha y son recolectados y dispuestos en el relleno sanitario, en este caso el relleno sanitario Nuevo Mondoñedo, se determinó con base en los datos reportados en el Servicio Único de Información (SUI) para el periodo 2012-2016 [71]. Con estos valores históricos se realizó una proyección para estimar la cantidad de residuos de barrido de Soacha dispuestos en el año base (2018). De igual forma, con una relación entre la población de Soacha y la de Ciudad Verde, se determinó la cantidad de residuos de barrido generados por el macroproyecto de vivienda y que fueron dispuestos en el relleno sanitario en el año base (Tabla 51).

Tabla 51 Estimación residuos de barrido recolectados Ciudad Verde en 2018.

	Población 2018	Residuos de barrido recolectados en 2018 (t/año)
Cabecera Municipal Soacha	640143 [72]	20580.8
Ciudad Verde	133604	**4295.4**

La composición de los residuos de barrido se estimó basada en el estudio de los residuos de barrido en la municipalidad de Trujillo, Perú [73], dado que no se encontraron datos específicos para Soacha; se asume que la composición no sea muy diferente.

Tabla 52. Composición residuos de barrido.
Tomado de [73].

Tipo de material	Residuos relleno (% Peso Base Húmeda)
Metal	0.23
Plástico	9.72
Materia orgánica	24.2
Vidrio	3.2
Cartón	4.25
Papel	5.1
Otros	7.3
Inertes	43.3
Residuos sanitarios	2.7

En un escenario de línea base, se asume que no habrá cambios en la cantidad per cápita ni en la composición de los residuos de barrido generados en Ciudad Verde y dispuestos en el relleno sanitario, por lo que la cantidad de estos residuos sólo cambiará año a año de acuerdo con la variación en el número de habitantes en Ciudad Verde.

- **Residuos de poda y corte de césped**

Para estimar los residuos de corte de césped y poda de árboles de Ciudad Verde se estableció la cantidad de residuos generados por metro cuadrado intervenido según información del PGIRS del municipio de Soacha [24]. Posteriormente, esta cantidad fue multiplicada por los metros cuadrados objeto de actividades de corte de césped y poda de árboles en Ciudad Verde que fueron reportados por la empresa Aseo Internacional S.A. E.S.P. [23]. Dado que los residuos de poda, de acuerdo con el PGIRS [24], no son objeto de ningún tipo de aprovechamiento, la cantidad de residuos generados en el macroproyecto son iguales a las dispuestas en el relleno sanitario.

Tabla 53. Residuos de poda y corte de césped generados en Ciudad Verde.

Residuos de poda y corte de césped (t/m^2/año)	Área intervenida en CV (m^2)	Residuos poda y corte de césped CV (t/año)
0.00025	428753	108.3

- **Residuos de construcción y demolición (RCD)**

Los RCD generados durante la construcción de las edificaciones de vivienda cada año se estimaron a partir de los índices de generación de residuos de construcción de un proyecto de vivienda de interés social en Cali durante la fases de excavación, estructura y acabados (comprende actividades como enchape de cerámicos en baños y cocina y áreas comunes) [74]. El promedio de los valores reportados en este estudio para generación de RCD durante la etapa de excavación en sistemas industrializados para viviendas de interés social fue de 572.3 kg/m2 y el valor medio para el índice de generación de residuos en la etapa de estructuras y acabados en estos proyectos de vivienda fue de 73.38 kg/m2. El procedimiento detallado para la estimación del índice de generación de RCD para los demás tipos de sistemas constructivos de edificaciones residenciales se muestra en el anexo. Para las edificaciones institucionales, se empleó el índice de generación de RCD (0.316 t/m^2) encontrado en [75] a partir de mediciones durante la construcción de un colegio en el municipio de Belén de los Andaquíes en el departamento del Caquetá.

Por su parte, durante la operación del proyecto se generan RCD atribuidos a la fase de acabados[7] realizados por los compradores y remodelaciones. Para estimar una aproximación de las emisiones causadas por el transporte de estos residuos a sitios de disposición final, se asumió que se generaba aproximadamente $0.05 m^3/m^2$ [76] de edificación construida, lo que representa un promedio de generación de 13,493.8 t RCD/año por los acabados de las edificaciones construidas entre 2018 y 2023 (año de finalización de construcción del proyecto). Sin embargo, dada la escasez de información específica para proyectos de vivienda de este tipo en el contexto local, no se incluirá este valor de emisiones dentro de la línea base. Como resultado se obtiene el siguiente consolidado de generación de todos los tipos de residuos considerados en el presente análisis para Ciudad Verde entre 2018 – 2030.

Tabla 54. Cantidad de residuos generados en Ciudad Verde por tipo y año

Residuos generados CV	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**
Habitantes Ciudad Verde	133,604	143,983	155,364	164,457	173,271	175,900	173487
Generación residuos domiciliarios (kg/hab/día)	0.548	0.664	0.672	0.680	0.689	0.698	0.707
Residuos domiciliarios (t/año)	26,723.5	34,908.9	38,092.7	40,815.2	43,571.6	44,813.2	44,790.2
Residuos de barrido (t/año)	4,295.4	4,629.1	4,995.0	5,287.3	5,570.7	5,655.2	5,577.7
Residuos poda y corte de césped (t/año)	108.3	108.3	108.3	108.3	108.3	108.3	108.3
RCD construcción (t/año)	172,470.9	120,094.1	131,370.8	130,137.3	130,137.3	58,742.3	0.0
TOTAL (t/año)	203,598.0	159,740.5	174,566.8	176,348.2	179,388.0	109,319.0	50,476.1

Residuos generados CV	**2025**	**2026**	**2027**	**2028**	**2029**	**2030**
Habitantes Ciudad Verde	171,107	168,759	166,444	164,160	161,908	159,686
Generación residuos domiciliarios (kg/hab/día)	0.717	0.726	0.736	0.745	0.755	0.766
Residuos domiciliarios (t/año)	44,778.9	44,743.0	44,699.5	44,665.7	44,642.1	44,628.3
Residuos de barrido (t/año)	5,501.1	5,425.7	5,351.2	5,277.8	5,205.4	5,134.0
Residuos poda y corte de césped (t/año)	108.3	108.3	108.3	108.3	108.3	108.3
RCD construcción (t/año)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TOTAL (t/año)	50,388.3	50,277.0	50,159.0	50,051.8	49,955.8	49,870.6

- **Emisiones por transporte de residuos**

Para estimar las emisiones por transporte de residuos generados por Ciudad Verde es necesario cuantificar la cantidad que se recolecta y se envía al relleno para disposición final. En el caso de los residuos domiciliarios aprovechados, se asume que el transporte se realiza en medios no motorizados dado que, según el Censo de la Población Recicladora de Oficio de Soacha, sólo el 6.2% de los encuestados utiliza vehículos automotores [20], y las emisiones generadas por este transporte representan aproximadamente el 0.03% de las emisiones del sector residuos en 2018, por lo que no serán consideradas en el análisis.

Por un lado, la cantidad de residuos domiciliarios de Ciudad Verde que fueron dispuestos en el relleno sanitario Nuevo Mondoñedo se calculó a partir de la resta entre la cantidad total de residuos generados en Ciudad Verde durante 2018 (Tabla 54) y los residuos que fueron aprovechados. Los valores de residuos aprovechados por tipo se obtuvieron del PGIRS del municipio de Soacha [24] realizando una relación entre la población de Ciudad Verde y la población total de Soacha en el año 2018 (Tabla 55). Además, se asumió que, en el escenario de línea base, el porcentaje de aprovechamiento de residuos sobre el total de los residuos generados se mantendría igual que en el año base.

[7] Es importante resaltar que en Ciudad Verde las viviendas se entregan en *obra gris*

Tabla 55 Cantidad de residuos generados en Ciudad Verde que son aprovechados. Calculado a partir de datos de [20]

Material	Aprovechados Ciudad Verde (t/año)
Cartón	1912.6
Metal	562.8
PET	152.9
Papel	524.3
Bolsa plástica	209.5
Vidrio	143.5
PEAD	172.6
PP	117.5
PEBD	94.4
Madera	122.7
Muebles y otros	109.6
TOTAL	4122.5

Como se mencionó en la sección anterior, la totalidad de residuos de poda y corte de césped y de barrido generados son transportados y dispuestos en el relleno sanitario.

Para el caso de los RCD generados durante la construcción, como se explica en el anexo, se utilizaron los valores de generación y aprovechamiento de RCD de la empresa Amarilo para VIS y VIP en 2017 para estimar la cantidad de RCD que se envían a disposición final por m^2 construido. A continuación, se muestra el consolidado de la cantidad de residuos estimados que son transportados a sitios de disposición final por tipo de residuo.

Tabla 56. Cantidad de residuos transportados a sitios de disposición final por tipo de residuo

AÑO	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Residuos Domiciliarios (t)	22,600.9	29,523.7	32,216.3	34,518.8	36,850.0	37,900.0	37,880.5
Residuos de Barrido (t)	4,295.4	4,629.1	4,995.0	5,287.3	5,570.7	5,655.2	5,577.7
Residuos de Poda (t)	108.3	108.3	108.3	108.3	108.3	108.3	108.3
RCD construcción (t)	107,183.7	74,532.8	81,543.9	80,828.0	80,828.0	36,522.4	0.0

AÑO	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Residuos Domiciliarios (t)	37,871.0	37,840.7	37,803.8	37,775.3	37,755.3	37,743.7
Residuos de Barrido (t)	5,501.1	5,425.7	5,351.2	5,277.8	5,205.4	5,134.0
Residuos de Poda (t)	108.3	108.3	108.3	108.3	108.3	108.3
RCD construcción (t)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

En el caso de los residuos domiciliarios, de barrido y de poda y corte césped, estos son recolectados por la empresa Aseo Internacional S.A. y transportados al relleno sanitario Nuevo Mondoñedo [20]. Para los RCD generados durante la construcción, se asume que los residuos son transportados al sitio de disposición final utilizado por el municipio de Soacha para disponer sus residuos de construcción y demolición (Recuperación Morfológica y construcción de banco de suelo Vereda Panamá) [20] ubicado a aproximadamente 9 km de Ciudad Verde. Los criterios para la escogencia de los vehículos recolectores y el cálculo de las emisiones se muestran en el anexo. En la siguiente tabla se presentan los parámetros utilizados para el cálculo de las emisiones atribuidas al transporte de residuos domiciliarios de barrido y poda y corte de césped, y de RCD de la etapa de construcción de las edificaciones.

Tabla 57. Parámetros para el cálculo de emisiones por transporte de residuos al sitio de disposición final

Parámetros	Notación	Valor Residuos domiciliarios, de barrido y poda y corte de césped	Valor RCD
Capacidad promedio camiones en masa (t)	C_m	13.8	6
Recorrido interno aproximado (km)	d_{int}	28.7 (Calculado a partir de [77])	
Distancia CV - Relleno (km)	d_{CV-RS}	26	8.9
Rendimiento combustible promedio (km/gal)	RCP	9	
Uso capacidad de camiones (%)	u_{cap}	70	
Combustible empleado		Diesel B10 (Mezcla Comercial)	
Densidad combustible (kg/L)	ρ_c	0.86 [78]	
Poder Calorífico Inferior combustible (kJ/kg)	LHV	42149.7 [78]	
Factor de emisión CO_2 del combustible (kg/TJ)	FE_{CO2}	74831.8 [78]	
Factor de emisión CH_4 del combustible (kg/TJ)	FE_{CH4}	3.9 [78]	
Factor de emisión N_2O del combustible (kg/TJ)	FE_{N2O}	3.9 [78]	
Potencial calentamiento global CO_2	GWP_{CO2}	1 [79]	
Potencial calentamiento global CH_4	GWP_{CH4}	21 [79]	
Potencial calentamiento global N_2O	GWP_{N2O}	310 [79]	

Para la proyección de la línea base hasta 2030, se asume que no habrá cambios en la tecnología de los camiones utilizados, por tanto, su capacidad y rendimiento se mantendrán constantes. Además, en este escenario, durante todo el periodo de estudio los residuos domiciliarios, de barrido y de poda y corte de césped seguirán disponiéndose en el relleno sanitario Nuevo Mondoñedo y los RCD en el lugar supuesto, por lo que la distancia recorrida por los camiones tampoco se modificará. En este sentido, los cambios en las emisiones causadas por el transporte de residuos se deberán únicamente a la variación en la cantidad de residuos de Ciudad Verde recolectados y transportados hasta el sitio de disposición final. Teniendo en cuenta los supuestos anteriores, se obtiene los siguientes resultados de emisiones atribuidas al transporte por cada tipo de residuo.

Tabla 58. Emisiones por transporte de residuos domiciliarios, municipales y RCD

Emisiones	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Residuos domiciliarios y municipales (tCO_{2-eq} /año)	261.4	331.7	361.3	386.4	411.8	422.7	421.8
RCD etapa de construcción (tCO_{2-eq}/año)	526.9	366.4	400.8	397.3	397.3	179.5	0.0

Emisiones	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Residuos domiciliarios y municipales (tCO_{2-eq} /año)	421.0	419.9	418.9	417.9	417.0	416.2
RCD etapa de construcción (tCO_{2-eq} /año)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

- **Emisiones por disposición de residuos**

La estimación de emisiones de metano provenientes del relleno sanitario Nuevo Mondoñedo, que son causadas por residuos domiciliarios, de barrido, de poda y corte de césped generados en Ciudad Verde, se realizó teniendo en cuenta los lineamientos del Nivel 2 del método de decaimiento de primer orden del IPCC [80]. En este sentido, se emplearon datos históricos de disposición específicos para el relleno en estudio y, también, parámetros estándar definidos por el IPCC para contenidos de carbono degradable y vida media de los residuos. El análisis se llevó a cabo para los años de 2018 a 2030; sin embargo, se tuvo en cuenta en el cálculo las emisiones causadas por la degradación de los residuos de CV que han sido dispuestos desde 2011 (año de inicio de operación del macroproyecto), dado que estos residuos generan GEI por varias décadas después de dispuestos. La estimación detallada de las emisiones por disposición de residuos se explica en el anexo.

Luego de comparar los residuos domiciliarios generados en Ciudad Verde y la cantidad aprovechada por tipo de material, se obtuvo la siguiente composición de los residuos domiciliarios que son recolectados y enviados al relleno sanitario Nuevo Mondoñedo, indispensable para el cálculo de las emisiones por descomposición de materia orgánica en el relleno sanitario:

Tabla 59. Composición de residuos domiciliarios dispuestos en el relleno

Tipo de material	Composición
Cartón	1,68%
Caucho	0,06%
Cenizas	0,00%
Cerámica	0,45%
Cuero	0,79%
Hueso	0,00%
Ladrillo	0,11%
Madera	0,30%
Orgánicos	37,67%
Metales	1,02%
Minerales	0,00%
Otros	2,59%
Papel	5,96%
Plástico	36,64%
Textil	8,03%
Vidrio	4,71%

De acuerdo con [81], en el relleno sanitario Nuevo Mondoñedo se captura y quema el 25% del biogás generado desde el año 2019 hasta el 2030. Según [80], las emisiones causadas por la quema de metano capturado no son significativas, pues el CO_2 liberado es de origen biogénico y las cantidades de CH_4 y N_2O emitidas son despreciables, por lo que no se tuvieron en cuenta en el presente inventario.

Considerando la captura y quema de 25% de biogás en el relleno y la cantidad de residuos domiciliarios, de barrido y de poda y corte de césped que se disponen en el relleno (Tabla 56), se obtuvo los siguientes resultados de emisiones de GEI por disposición de residuos en el relleno sanitario:

Tabla 60. Emisiones totales de CH4 por disposición de residuos domiciliarios, de barrido y de poda y corte de césped.

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
CH4 (t CH_4/año)	253.0	235.2	294.5	354.1	412.7	470.7	524.3
CH4 (t $CO_{2\text{-eq}}$/año)	5,312.3	4,939.1	6,185.0	7,435.6	8,666.8	9,885.0	11,011.2

	2025	2026	2027	2028	2029	2030
CH4 (t CH_4/año)	571.0	611.8	647.6	679.2	707.1	731.9
CH4 (t $CO_{2\text{-eq}}$ /año)	11,991.4	12,848.7	13,600.5	14,262.4	14,848.3	15,369.7

- **Lodos de tratamiento de agua residual**

A pesar de que actualmente las aguas residuales generadas por el macroproyecto de vivienda Ciudad Verde no tienen tratamiento, a partir de 2026 entrará en funcionamiento la Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) Canoas que tratará 100% de las aguas residuales del municipio de Soacha [82]. Considerando un escenario *Business as Usual*, se asumió que el tratamiento del agua residual en esta PTAR empleará la tecnología y etapas de tratamiento de la PTAR El Salitre (que trata parte del agua residual de Bogotá) en el año base. Siguiendo este supuesto, en la PTAR Canoas se realizará un tratamiento primario avanzado químicamente asistido, que incluye pretratamiento y decantación primaria. De este último proceso, se obtienen los lodos primarios que son enviados a espesadores para aumentar su concentración antes de enviarlos a digestión. En los digestores tiene lugar la estabilización biológica de

los lodos mediante digestión anaerobia a una temperatura de 35°C [83]. Cerca del 35% del biogás resultante es recuperado y aprovechado para calentar los lodos y mantener la temperatura requerida en el proceso de digestión. El biogás restante se almacena y se quema controladamente en una tea [84]. Por otro lado, los lodos digeridos pasan por una fase de deshidratación, obteniendo biosólidos con alto contenido de materia orgánica, nutrientes y aproximadamente 70% de humedad [83] [85]. Estos se aprovechan como abono para la conformación de cobertura vegetal en la recuperación de suelos degradados. Las características del biosólido obtenido actualmente, lo hacen apto para su uso en procesos de reforestación, pero no en agricultura para consumo [86].

Con base en la información proporcionada por la Empresa de Acueducto de Bogotá a través de los informes mensuales de actividades de la PTAR El Salitre, es posible estimar la cantidad promedio de biogás y biosólidos producidos por cada m^3 de agua tratada (Tabla 61). Con estos valores, se cuantificó la cantidad anual de biosólidos y biogás resultado del tratamiento de las aguas residuales (TAR) de Ciudad Verde desde 2026 (año de inicio de operación) hasta 2030 (Tabla 62). Los datos de caudal de agua residual generada por Ciudad Verde son calculados y presentados en el capítulo del sector Aguas.

Tabla 61. Productos de tratamiento de agua residual por m^3 de agua tratada

Productos de Tratamiento de Agua Residual	**Promedio**
m^3 biogás/m^3 agua	0.0538
t biosólido/ m^3 agua	0.0003

Tabla 62. Cantidad de biosólidos y biogás producidos por tratamiento de aguas residuales de CV.

	2026	**2027**	**2028**	**2029**	**2030**
Agua Residual (m3/año)	3391993.7	3383540.0	3383146.7	3365198.4	3355270.5
m3 N biogás/año	182358.2	181903.7	181882.6	180917.7	180383.9
t biosólido/ año	1154.1	1151.2	1151.1	1145.0	1141.6

Como se mencionó, las emisiones por quema en tea de metano capturado no son significativas debido al origen biogénico de la mayoría del CO_2 generado. Además, si el metano es aprovechado con fines energéticos, el IPCC recomienda reportar las emisiones de GEI resultantes en el sector de energía [80]. Debido al origen biogénico del CO_2 generado por la combustión de biogás y las bajas cantidades de CH_4 y N_2O asociadas, las emisiones atribuidas a la quema de biogás de lodos en tea y la combustión para aprovechamiento energético no serán contabilizadas en el presente inventario. Por su parte, los biosólidos obtenidos luego de la deshidratación de los lodos digeridos pueden ser generadores de emisiones de GEI, especialmente N_2O, si son usados como abono en tierras agrícolas [87]. Sin embargo, debido al alcance del presente inventario, las emisiones atribuidas a esta práctica no serán tenidas en cuenta dentro del sector de residuos.

- **Emisiones totales de GEI en el sector residuos**

Los resultados de la compilación de las emisiones de GEI aportadas por la disposición final de residuos en rellenos sanitarios y el transporte de residuos domiciliarios, de barrido, de corte de césped y poda y RCD se muestran en la Tabla 63 y la Figura 41.

Tabla 63. Emisiones totales de GEI del sector residuos por fuente de emisión

AÑO	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Disposición en relleno sanitario (t $CO_{2\text{-eq}}$ /año)	5.312.3	4.939.1	6.185.0	7.435.6	8.666.8	9.885.0	11.011.2
Transporte de RSD y municipales (t $CO_{2\text{-eq}}$ /año)	261.4	331.7	361.3	386.4	411.8	422.7	421.8
Transporte RCD Construcción (t $CO_{2\text{-eq}}$ /año)	526.9	366.4	400.8	397.3	397.3	179.5	0.0
TOTAL EMISIONES SECTOR RESIDUOS	6,100.6	5,637.1	6,947.1	8,219.3	9,475.9	10,487.3	11,433.0

AÑO	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Disposición en relleno sanitario (t $CO_{2\text{-eq}}$ /año)	11.991.4	12.848.7	13.600.5	14.262.4	14.848.3	15.369.7
Transporte de RSD y municipales (t $CO_{2\text{-eq}}$ /año)	421.0	419.9	418.9	417.9	417.0	416.2
Transporte RCD Construcción (t $CO_{2\text{-eq}}$ /año)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TOTAL EMISIONES SECTOR RESIDUOS	12,412.4	13,268.6	14,019.4	14,680.3	15,265.2	15,785.9

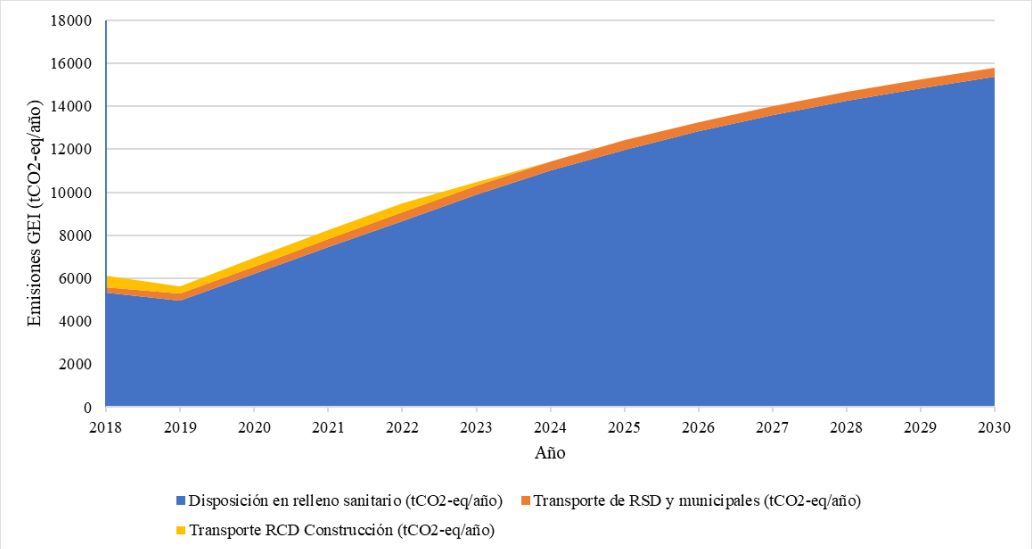


Figura 41. Emisiones totales de GEI sector residuos por fuente de emisión

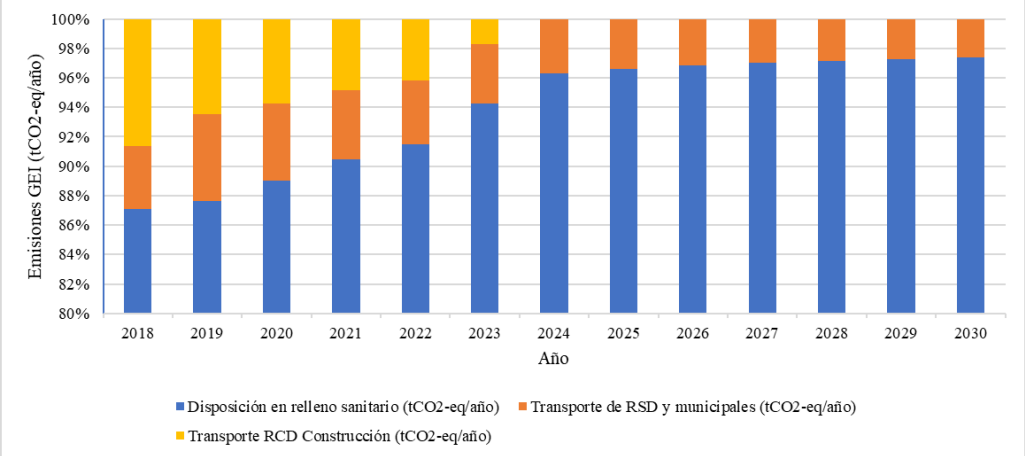


Figura 42. Aporte de las diferentes fuentes de emisión a las emisiones totales del sector residuos

De acuerdo con la cuantificación de la línea base de emisiones de GEI para el sector residuos, se observa que la mayor de parte de las emisiones corresponde metano originado en la descomposición anaerobia de residuos orgánicos en los rellenos sanitarios. Las emisiones por disposición en relleno y por transporte de residuos domiciliarios y municipales aumentan de manera similar durante el periodo del inventario, lo que se atribuye a que las emisiones anuales aportadas por cada una de estas fuentes varían principalmente con la cantidad de residuos generados, que a su vez depende del número de habitantes de Ciudad Verde y la proyección del aumento del PIB en el país cada año.

Además, se observa que las emisiones atribuidas al transporte de los RCD generados durante la construcción del proyecto constituyen cerca del 9% de las emisiones del sector en 2018, lo que evidencia la importancia del aumento en el aprovechamiento de los RCD generados desde el punto de vista de su transporte hasta sitios de disposición final y como una oportunidad para reducir las emisiones asociadas con la producción de materiales a partir de materias primas vírgenes.

El valor de emisiones per cápita del sector para el año base es de 0.04 $tCO_{2\text{-}eq}$/año y alcanza los 0.10 $tCO_{2\text{-}eq}$/año en el año 2030, lo que es coherente con el aumento en la cantidad de residuos per cápita ligado al crecimiento del PIB. Además, al contrastar estos resultados con el inventario nacional del sector residuos para 2014 [33], se encuentra que las emisiones per cápita del sector para el año base en Ciudad Verde son distan en los primeros años de análisis de las obtenidas por el inventario nacional de las emisiones provenientes de *Sitios gestionados de eliminación de desechos* (0.13 $tCO_{2\text{-}eq}$/año). Esta diferencia puede atribuirse a la cantidad de residuos domiciliarios generados per cápita particularmente baja de Soacha, así como el bajo contenido de materia orgánica rápidamente putrescible en los residuos generados (31.9%) en comparación con los niveles del país. Es importante tener en cuenta que en el sector residuos para fines del inventario nacional no se incluyen emisiones por transporte de residuos, por lo que los resultados no son perfectamente comparables. El inventario de las emisiones del sector residuos para Ciudad Verde en el escenario de línea base indica que las emisiones per cápita atribuidas a la gestión de residuos se duplicarán en 12 años si se continúa con las mismas alternativas de gestión, una tasa igual de aprovechamiento de residuos, permanencia en las tecnologías utilizadas y si la generación de residuos per cápita crece con la tendencia mundial en relación con el ingreso económico.

6.2.5. Movilidad sostenible

Las emisiones GEI para el escenario de la línea base se estimaron para el transporte de pasajeros considerando los viajes que realiza la población que habita en Ciudad Verde, según la siguiente ecuación. Las emisiones de CO_{2e} se estiman en función del consumo de combustible, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$E_{CO2e,j} = \sum_k F_{j,k} \cdot FE_k$$

En donde: $E_{CO2e,j}$ son las emisiones de CO_{2e} en el año j; k son los energéticos utilizados por el sector transporte; Fj,k es la demanda de energía por tipo de combustible k en el año j; y FE es el factor de emisión de CO_{2e} para cada tipo de combustible.

$$F_{j,k} = \sum_k A_{j,l} \cdot c_{k,l}$$

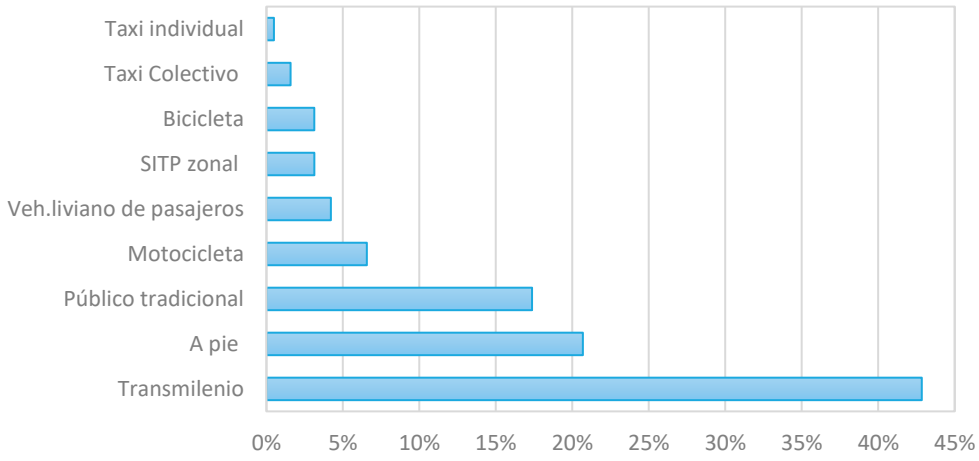
El consumo de combustible se estima en función de la actividad de la flota en el año j, por cada categoría l ($A_{l,j}$; l=buses, automóviles, etc.) y factores específicos de consumo de combustible, representativos para la flota local ($c_{l,k}$). La actividad de los vehículos se calcula según la demanda de viajes de los ciudadanos, la longitud típica de los viajes, los modos y tipo de flota que se utiliza para suplir dicha demanda, y otro tipo de información como la relativa a las condiciones de operación de los sistemas de transporte público.

La información sobre cantidad de viajes, distribución modal y longitud promedio de los viajes se obtuvo de las encuestas que se desarrollaron en la ciudadela. La caracterización de la flota por modo se realizó con base en información disponible para Bogotá-Región de la Encuesta de Movilidad de Bogotá y según información del RUNT para la flota registrada en Soacha. Teniendo en cuenta las características de la flota como tamaño de los vehículos, edad promedio y tipo de combustible, se asignaron los factores de consumo de combustible. Finalmente, los factores de emisión para cada uno de los combustibles se obtuvieron de la UPME.

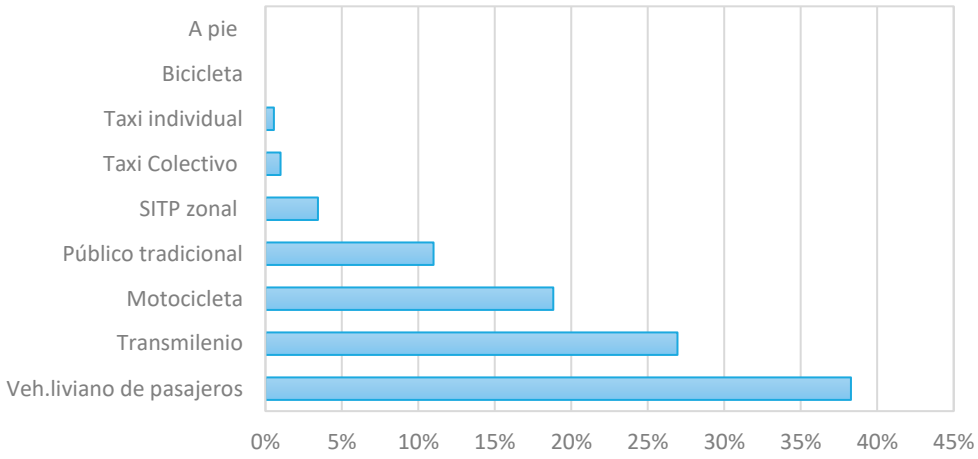
A partir de la información anterior, se estimaron las emisiones de CO_2, CH_4 y N_2O de los viajes que hace la población que habita en CV y se totalizaron en términos de CO_{2e} utilizando el índice de calentamiento global (GWP por sus siglas en inglés) para cada contaminante. En este estudio se aplicaron los factores del segundo reporte del IPCC, considerando que estos son los utilizados actualmente en Colombia (CO_2=1, CH_4=21, N_2O=310) [88]. A continuación, se detallan los resultados obtenidos para la línea base de emisiones del sector transporte para los años 2018-2030.

Los viajes que realiza la población en el año base se obtuvieron de la encuesta desarrollada en Ciudad Verde. La distribución modal de los viajes, con origen y destino en la misma ciudadela o viajes desde/hacia otras zonas, muestra que el 87% de los viajes se hacen en modos sostenibles: Transmilenio, a pie, transporte público tradicional, SITP zonal y bicicleta.

Los tres modos de mayor aporte en las emisiones anuales de CO_{2e} son en su orden: viajes en vehículos privados (38.3%), viajes en Transmilenio (26.9%) y viajes en motocicleta (18.8%). La contribución de los modos de transporte privado en las emisiones totales es del 57.1% pero en éstos se hace solo el 10.8% de los viajes (ver Figura 43).



(a) Distribución modal.



(b) Contribución en emisiones anuales de CO_{2e}.
Figura 43. Año base: viajes y emisiones.

Para el periodo 2018-2030 los viajes totales se proyectaron en función del crecimiento de la población, lo que resulta en un aumento del 28% de los viajes anuales durante el periodo de análisis. Para el escenario de línea base se supuso que la distribución modal, la longitud promedio de los viajes y el tipo de flota se mantienen iguales respecto al año 2018 (ver Figura 44). Asociados a los viajes se generan 25.4 millones de toneladas de CO_{2e} en el año 2018 y 32.7 millones en el año 2030 (ver Figura 45).

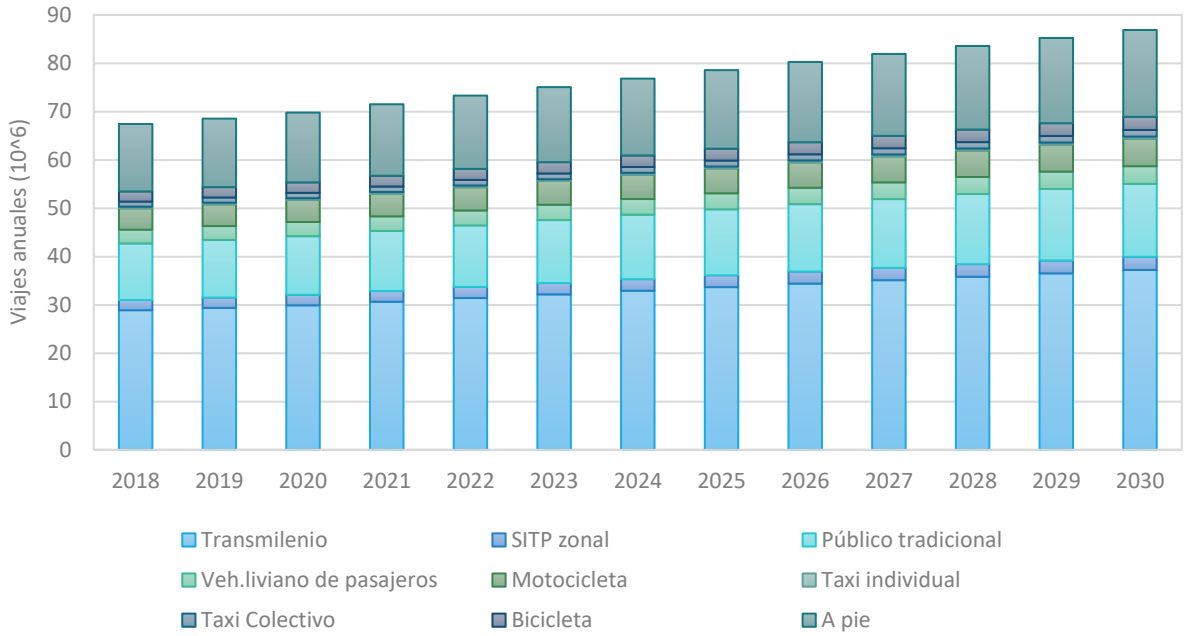


Figura 44. Viajes anuales 2018-2030.

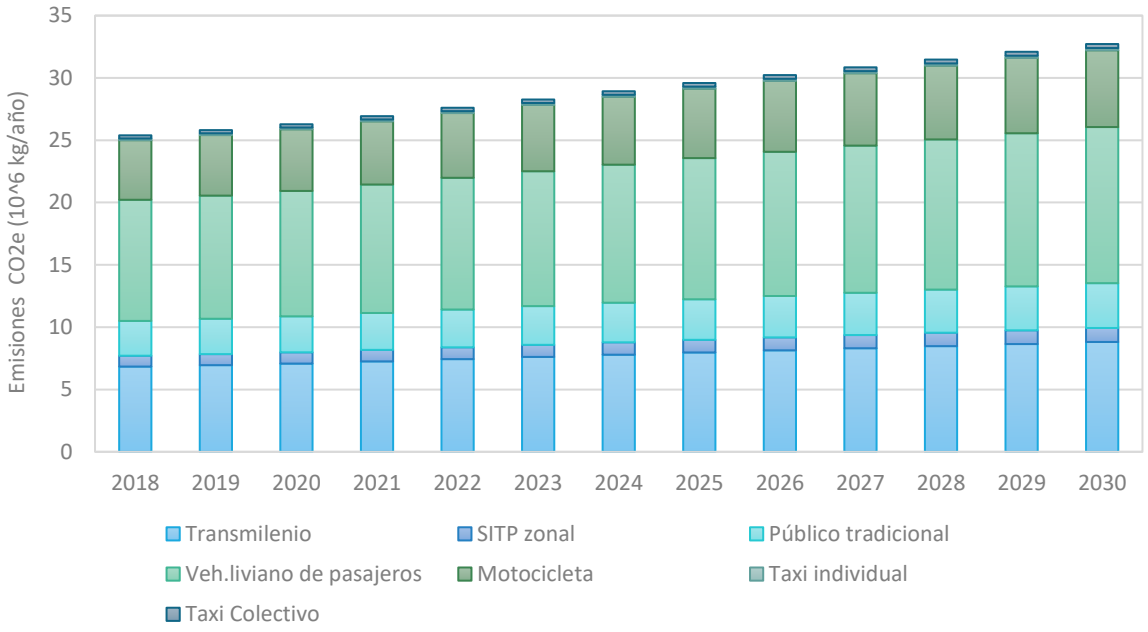


Figura 45. Emisiones anuales de CO_{2e} escenario de línea base 2018-2030.

6.2.6. Edificaciones e infraestructura urbana

Las emisiones de GEI asociadas a este sector incluyen tanto las generadas por las edificaciones como las de la infraestructura urbana. Las emisiones contempladas en el análisis incluyen la operación de todas las edificaciones del macroproyecto durante el periodo de análisis (2018-2030) y la construcción misma de las edificaciones y obras de infraestructura urbana realizadas durante el mismo lapso.

A continuación, se presentan las emisiones embebidas de las edificaciones y de la infraestructura urbana y posteriormente se presentan las de las emisiones asociadas a la operación de las edificaciones.

- ***Emisiones incorporadas***

La cuantificación de las emisiones $CO_{2\text{-eq}}$ en esta etapa incluye el carbono generado por las edificaciones y obras de infraestructura construidas específicamente durante el periodo de análisis (2018 a 2030).

- **Emisiones incorporadas de edificaciones residenciales**

Las emisiones incorporadas (o embebidas) de las edificaciones residenciales son las generadas en las etapas previas a la operación de las viviendas. Se tiene en cuenta la etapa de producto (que incluye la extracción de materia prima, el transporte hasta la fábrica y la producción del material), la etapa de transporte (de materiales y maquinaria) y la etapa de construcción de la edificación.

En la Tabla 64 se presentan los valores referentes a la línea base de las emisiones incorporadas de las edificaciones residenciales de los cinco materiales analizados y de las etapas de transporte y construcción. En la columna final se presentan las emisiones totales.

Tabla 64. Línea base de emisiones incorporadas de las edificaciones residenciales

Emisiones $CO_{2\text{-eq}}$ (t/año)								
Año	**Cemento**	**Acero**	**Ladrillo**	**Vidrio**	**Agregados**	**Transporte**	**Construcción**	**Total**
2018	28,831.0	12,401.5	5,431.8	790.0	227.2	6,221.1	3,073.1	56,975.8
2019	19,664.8	8,458.7	3,704.9	538.8	155.0	4,243.2	2,096.1	38,861.6
2020	21,562.7	9,275.1	4,062.5	590.8	170.0	4,652.7	2,298.4	42,612.1
2021	21,562.7	9,275.1	4,062.5	590.8	170.0	4,652.7	2,298.4	42,612.1
2022	21,562.7	9,275.1	4,062.5	590.8	170.0	4,652.7	2,298.4	42,612.1
2023	9,886.2	4252.5	1,862.6	270.9	77.9	2,133.2	1,053.8	19,537.2
2024	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2025	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2026	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2027	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2028	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2029	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2030	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

La Figura 46 presenta gráficamente las emisiones de $CO_{2\text{-eq}}$ (medidas en toneladas/año) generadas por las edificaciones residenciales. Se presentan de manera separada las emisiones de los cinco materiales analizados y de las etapas de transporte y construcción.

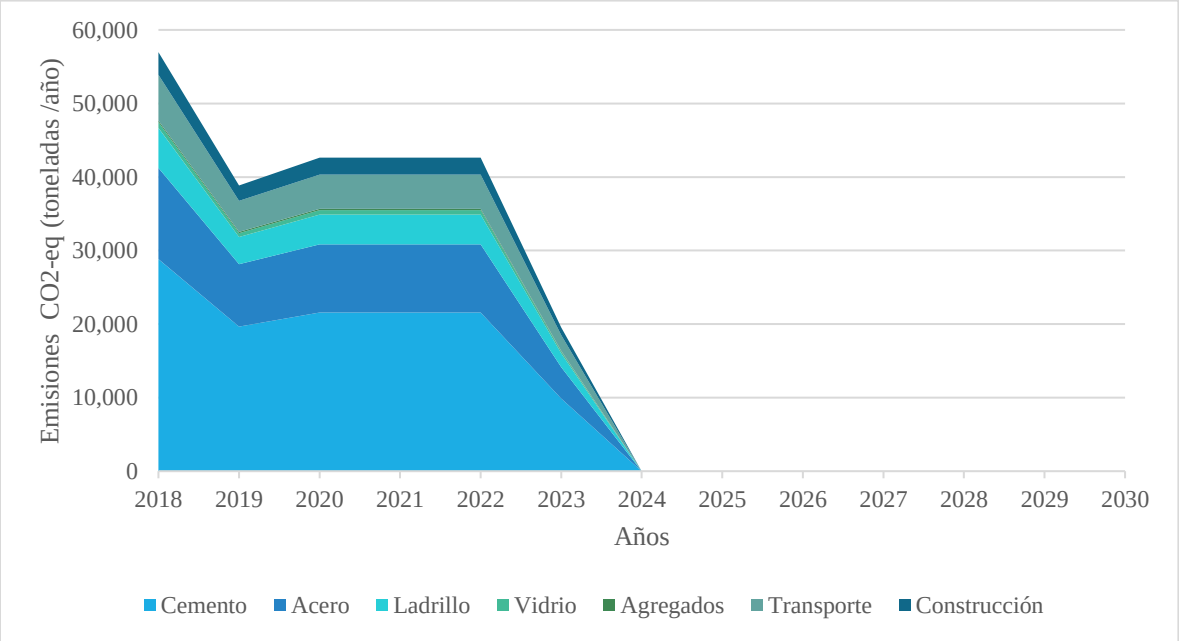


Figura 46. Emisiones incorporadas asociadas al sector residencial

- **Emisiones incorporadas a edificaciones no residenciales**

El carbono embebido de las edificaciones no residenciales es el generado en las diferentes etapas de construcción de las edificaciones no residenciales durante el periodo de análisis: un hospital, un colegio, y un centro comercial. Se toman en consideración los materiales de construcción requeridos, su transporte hasta la obra y el proceso constructivo empleado.

En la Tabla 65 se presentan los valores referentes a la línea base de las emisiones incorporadas de las edificaciones no residenciales de los cinco materiales analizados y de las etapas de transporte y construcción. En la columna final se presentan las emisiones totales.

Tabla 65. Línea base de emisiones incorporadas de las edificaciones no residenciales

Emisiones $CO_{2\text{-eq}}$ (t/año)								
Año	**Cemento**	**Acero**	**Ladrillo**	**Vidrio**	**Agregados**	**Transporte**	**Construcción**	**Total**
2018	774.9	283.9	102.3	23.0	5.0	94.7	31.9	1, 315.6
2019	2, 235.2	863.6	309.1	68.4	14.3	264.7	89.2	3, 844.5
2020	2, 235.2	863.6	309.1	68.4	14.3	264.7	89.2	3, 844.5
2021	1, 522.0	673.0	237.3	50.6	9.7	164.2	55.3	2, 712.2
2022	1, 522.0	673.0	237.3	50.6	9.7	164.2	55.3	2, 712.2
2023	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2024	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2025	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2026	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2027	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2028	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2029	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2030	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

La Figura 47 presenta gráficamente las emisiones de $CO_{2\text{-eq}}$ (medidas en toneladas/año) generadas por las edificaciones residenciales. Se presentan de manera separada las emisiones de los cinco materiales analizados y de las etapas de transporte y construcción.

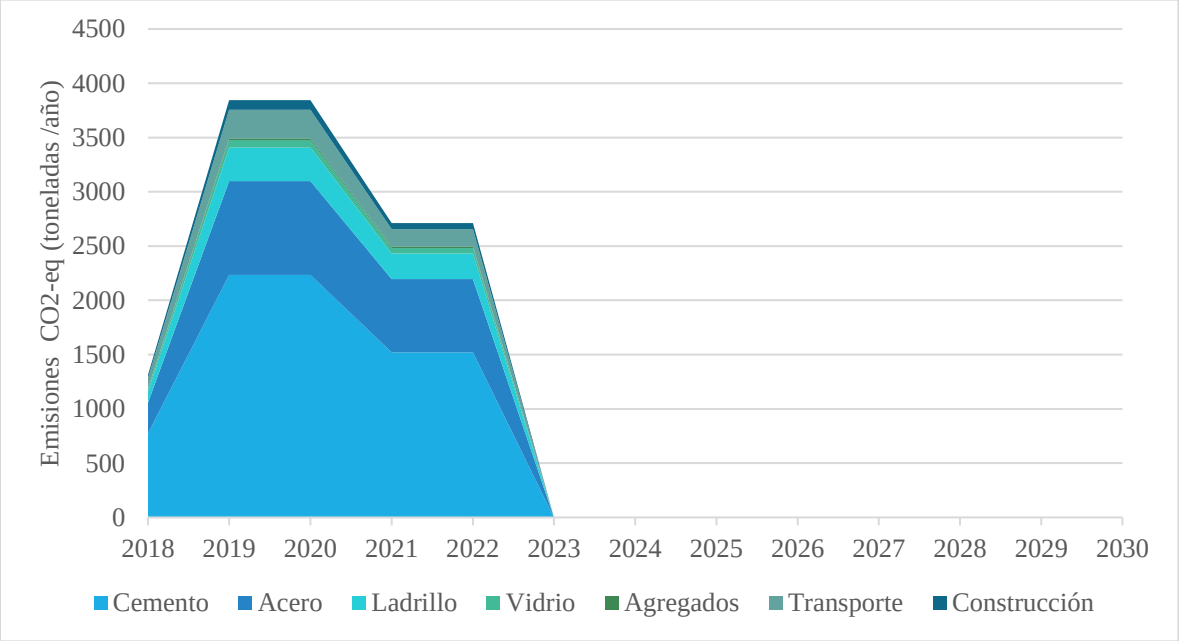


Figura 47. Emisiones incorporadas asociadas al sector residencial

- **Emisiones incorporadas a la infraestructura urbana**

En la Tabla 66 se presentan los valores referentes a la línea base de las emisiones incorporadas de la infraestructura urbana de los cinco materiales y componentes que fueron analizados (mezcla asfáltica, adoquines, cemento, base, subbase y agregados). En la columna final se presentan las emisiones totales.

Tabla 66. Línea base de emisiones incorporadas de la infraestructura urbana

Emisiones $CO_{2\text{-eq}}$ (t/año)						
Año	**Mezcla asfáltica**	**Adoquines**	**Cemento**	**Base y sub base**	**Agregados**	**Total**
2018	1, 963.3	1, 003.6	453.4	121.0	5.2	3, 546.5
2019	0.0	684.5	0.0	14.7	0.0	699.2
2020	2, 444.3	750.6	68.7	99.8	0.8	3, 364.2
2021	2, 444.3	750.6	68.7	99.8	0.8	3, 364.2
2022	2, 444.3	750.6	68.7	99.8	0.8	3, 364.2
2023	2, 444.3	344.1	68.7	91.1	0.8	2, 949.0
2024	2, 444.3	0.0	68.7	83.7	0.8	2, 597.5
2025	2, 444.3	0.0	68.7	83.7	0.8	2, 597.5
2026	2, 444.3	0.0	68.7	83.7	0.8	2, 597.5
2027	2, 444.3	0.0	68.7	83.7	0.8	2, 597.5
2028	2, 444.3	0.0	68.7	83.7	0.8	2, 597.5
2029	558.2	0.0	68.7	27.4	0.8	655.1
2030	2, 999.9	0.0	68.7	100.3	0.8	3, 169.7

La Figura 48 presenta gráficamente las emisiones de $CO_{2\text{-eq}}$ (medidas en toneladas/año) generadas por cada uno de los cinco materiales y componentes previamente mencionados.

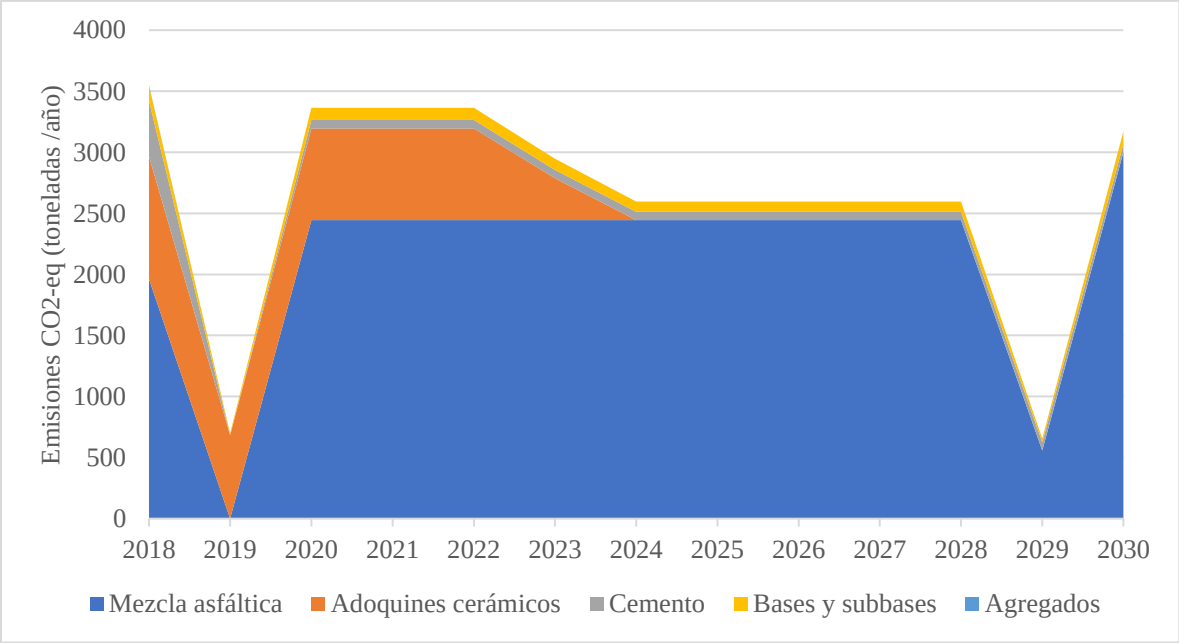


Figura 48. Emisiones incorporadas asociadas a la infraestructura urbana

- **Emisiones en la operación de edificaciones**

La cuantificación de las emisiones de CO_2-eq causadas por la operación de edificaciones se realizó discriminando entre edificios residenciales y no residenciales, existentes y planeados durante el periodo de análisis (2018-2030). Las emisiones presentadas para ambas categorías de edificaciones están asociadas al consumo energético, de electricidad y gas natural en estas.

- **Emisiones operación edificaciones residenciales**

En esta sección se presentan las emisiones de CO_2-eq del sector vivienda, asociadas al consumo de energía en la operación de equipos domésticos. Esta cuantificación se realizó para el escenario base de

Ciudad Verde en el periodo 2018 – 2030. Para la evaluación de las emisiones se consideraron los consumos de energía por iluminación, y los principales equipos domésticos por uso (cocción, refrigeración, calentamiento de agua, televisión, plancha, lavado de ropa y computadores) [38], [89]. La Tabla 67 presenta el total de las emisiones cuantificadas según lo descrito, discriminando entre los dos energéticos respectivos. Adicionalmente, la Figura 49 ilustra el comportamiento de las emisiones según el tipo de equipo doméstico.

Tabla 67. Línea base de emisiones según energético

Emisiones CO2-eq (t/año)			
Año	**Electricidad**	**Gas natural**	**Total**
2018	10,637.38	15,874.13	26,511.51
2019	11,823.03	17,686.62	29,509.65
2020	13,028.27	19,361.68	32,389.96
2021	14,206.47	20,555.62	34,762.10
2022	15,429.80	21,715.71	37,145.52
2023	16,336.71	22,601.70	38,938.41
2024	16,444.66	22,426.37	38,871.03
2025	16,462.80	22,132.47	38,595.27
2026	16,472.01	21,841.66	38,313.67
2027	16,464.59	21,554.31	38,018.90
2028	16,456.21	21,270.73	37,726.93
2029	16,446.73	20,990.89	37,437.62
2030	16,436.08	20,714.73	37,150.81

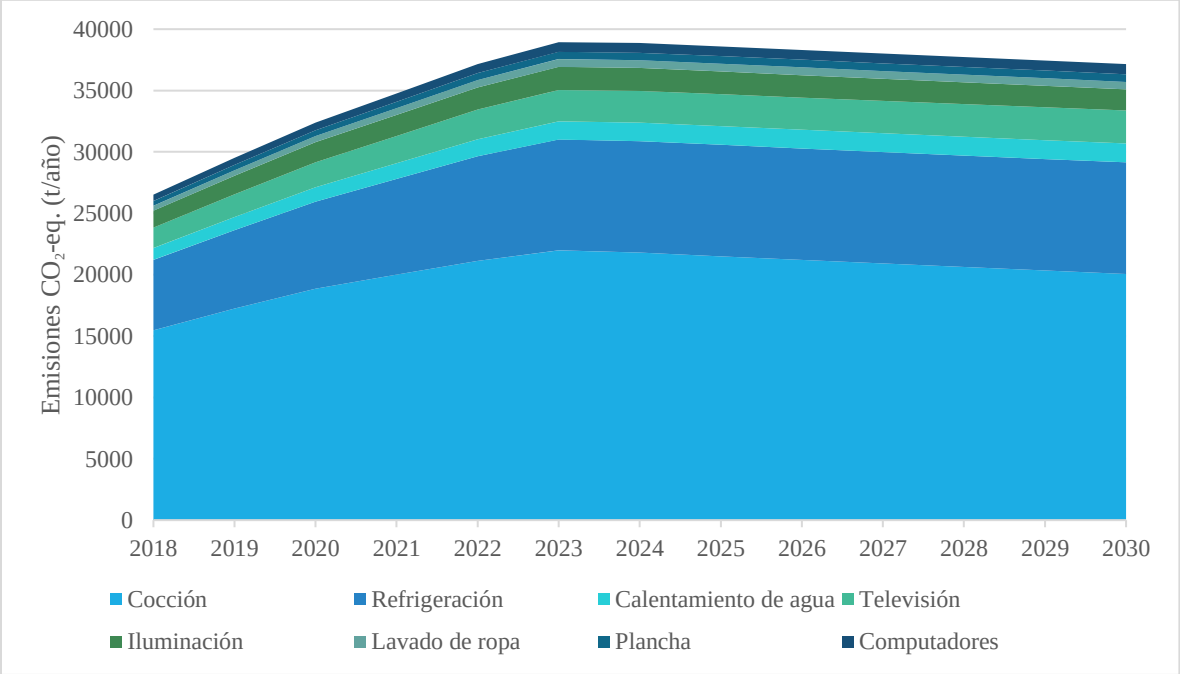


Figura 49. Línea base de emisiones por operación de equipos domésticos

- **Emisiones operación edificaciones residenciales con escenario de confort**

En esta sección se agregan las emisiones de CO2-eq del sector vivienda, asociadas al consumo de energía en la operación del sistema de calefacción bajo un escenario de confort térmico. Para la definición de esta

nueva línea base de confort se partió de la línea base de emisiones asociadas a la operación de electrodomésticos, para luego sumar las emisiones provenientes del consumo de electricidad por la calefacción. La Tabla 68 presenta el total de las emisiones cuantificadas según lo descrito, discriminando entre los dos energéticos considerados. Asimismo, la Figura 50 presenta el comportamiento de la línea base de emisiones por equipos domésticos y la línea base de emisiones de confort.

Tabla 68. Emisiones asociadas al sector residencial bajo escenario de confort durante la operación 2018-2030

Emisiones CO2-eq (t/año)			
Año	**Electricidad**	**Gas natural**	**Total**
2018	43,483	15,874	59,358
2019	47,447	17,686	65,134
2020	51,468	19,361	70,830
2021	55,462	20,555	76,018
2022	59,501	21,715	81,217
2023	61,699	22,601	84,301
2024	61,807	22,426	84,234
2025	61,826	22,132	83,958
2026	61,835	21,841	83,676
2027	61,827	21,554	83,382
2028	61,819	21,270	83,090
2029	61,809	20,990	82,800
2030	61,799	20,714	82,514

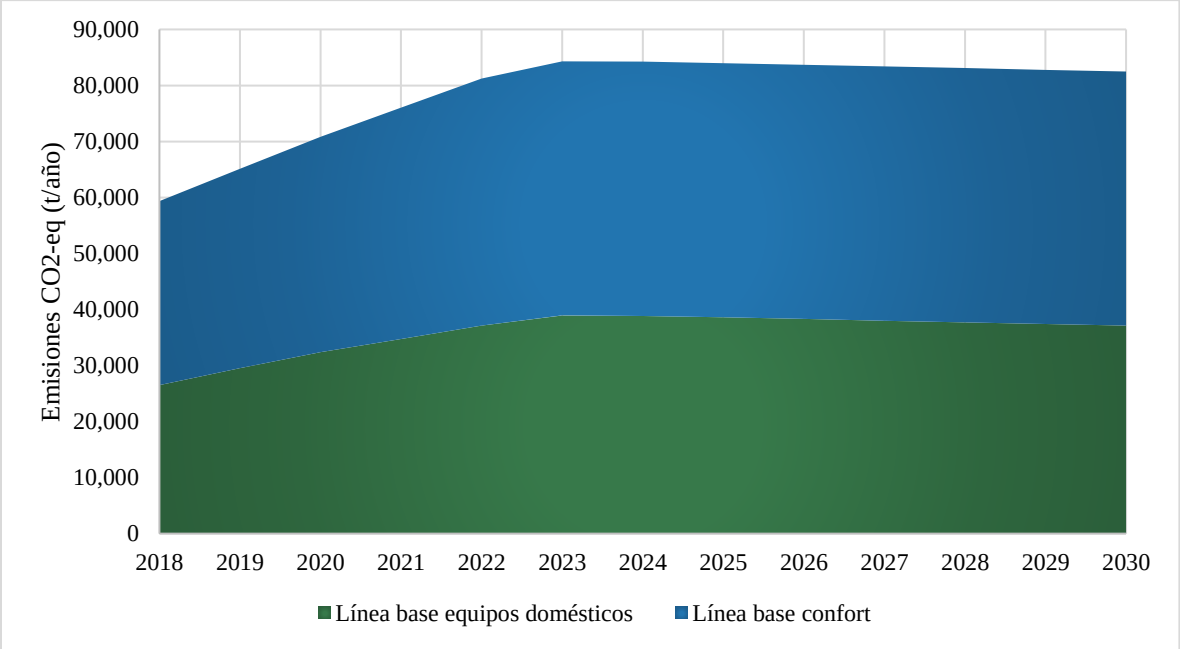


Figura 50. Emisiones asociadas al sector residencial bajo escenario de confort durante la operación 2018-2030

- **Emisiones operación edificaciones no residenciales**

Las emisiones asociadas al sector no residencial corresponden a las emisiones provenientes de edificaciones como centros comerciales, colegios, salud y otros. La Tabla 69 presenta las emisiones asociadas al sector no residencial provenientes de los consumos de electricidad y gas natural para el periodo de tiempo 2018-2030. Los resultados pueden observarse de forma gráfica en la Figura 51.

Tabla 69. Emisiones asociadas al sector no residencial durante la operación 2018-2030

Año	Electricidad	Gas natural			Total
	tCO_2	tCO_2	tCH_4	tN_2O	$tCO_{2\text{-eq}}$
2018	672.5	34.9	$6.3 \cdot 10^{-4}$	$6.3 \cdot 10^{-5}$	707.4
2019	672.5	34.9	$6.3 \cdot 10^{-4}$	$6.3 \cdot 10^{-5}$	707.4
2020	672.5	34.9	$6.3 \cdot 10^{-4}$	$6.3 \cdot 10^{-5}$	707.4
2021	688.9	34.9	$6.3 \cdot 10^{-4}$	$6.3 \cdot 10^{-5}$	723.7
2022	688.9	34.9	$6.3 \cdot 10^{-4}$	$6.3 \cdot 10^{-5}$	723.7
2023	1,296.5	408.2	$7.4 \cdot 10^{-3}$	$7.4 \cdot 10^{-4}$	1704.7
2024	1,296.5	408.2	$7.4 \cdot 10^{-3}$	$7.4 \cdot 10^{-4}$	1704.7
2025	1,296.5	408.2	$7.4 \cdot 10^{-3}$	$7.4 \cdot 10^{-4}$	1704.7
2026	1,296.5	408.2	$7.4 \cdot 10^{-3}$	$7.4 \cdot 10^{-4}$	1704.7
2027	1,296.5	408.2	$7.4 \cdot 10^{-3}$	$7.4 \cdot 10^{-4}$	1704.7
2028	1,296.5	408.2	$7.4 \cdot 10^{-3}$	$7.4 \cdot 10^{-4}$	1704.7
2029	1,296.5	408.2	$7.4 \cdot 10^{-3}$	$7.4 \cdot 10^{-4}$	1704.7
2030	1,296.5	408.2	$7.4 \cdot 10^{-3}$	$7.4 \cdot 10^{-4}$	1704.7

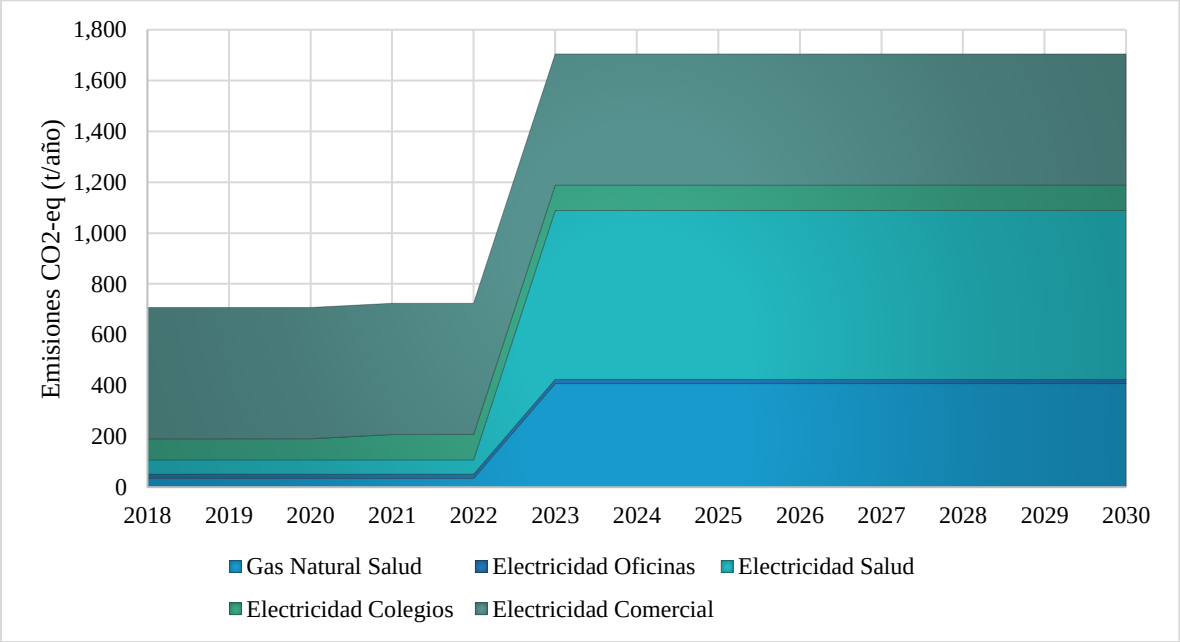


Figura 51. Emisiones asociadas al sector no residencial durante la operación 2018-2030

- **Emisiones totales del sector**

En esta sección se presentan las emisiones de CO_2-eq totales del sector. Se incluyen las emisiones asociadas tanto a la construcción como a la operación de las viviendas. En la Figura 52 se presentan las emisiones del escenario base mientras que en la Figura 53 se incluyen las emisiones del escenario de confort.

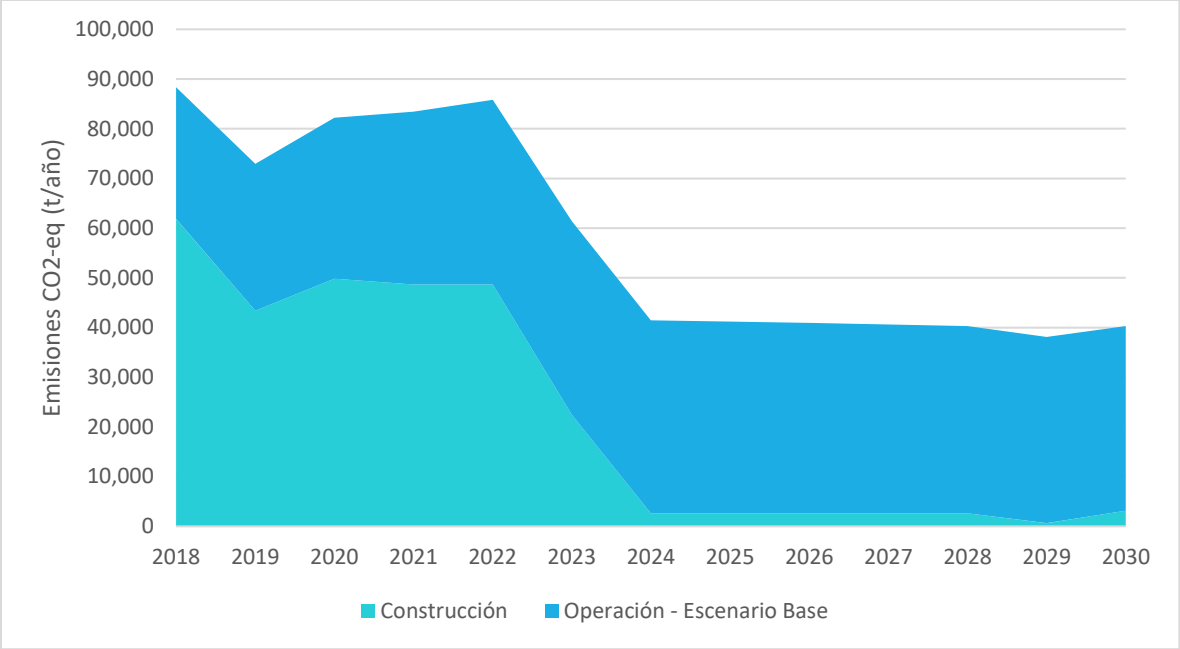


Figura 52. Emisiones asociadas a la totalidad del sector Edificaciones e Infraestructura Urbana – Escenario base

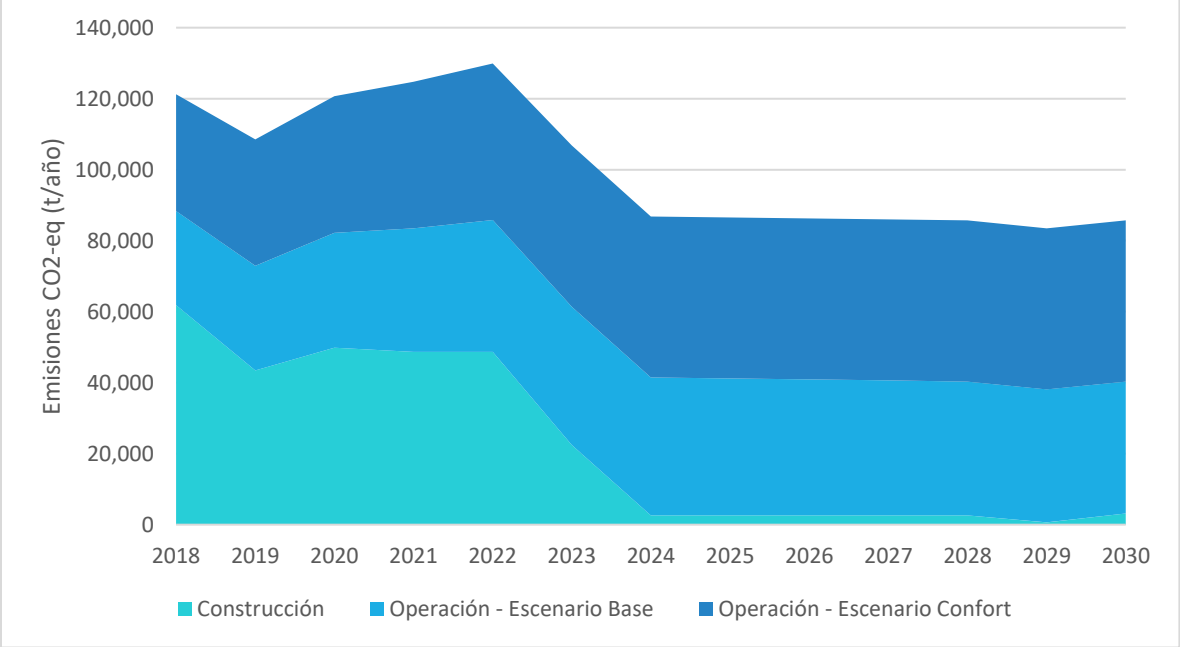


Figura 53. Emisiones asociadas a la totalidad del sector Edificaciones e Infraestructura Urbana – Escenario confort

6.2.7. Análisis integrado de la línea base

La
Figura 54 presenta las emisiones estimadas para todos los sectores en la línea base de Ciudad Verde, entre el 2018 y el 2030, para la clasificación principal empleada en el proyecto. Del total de las emisiones, el sector que mayor aporte genera a las mismas es el de infraestructura urbana (i.e., 57.8%). En dicho sector las emisiones están principalmente representadas por la energía embebida en los materiales y su uso en la

construcción de la infraestructura planteada entre el 2018 y el 2030, así como el consumo de energía por el uso de equipos domésticos. A su vez, el sector de transporte genera el 28.1% de las emisiones totales cuantificadas. En este sector las emisiones están representadas por el uso de combustibles en los viajes de los habitantes de Ciudad Verde. El sector de residuos, por su parte, genera el 10% de las emisiones totales cuantificadas. Dichas emisiones están asociadas principalmente al transporte y a la disposición final de los residuos en el relleno sanitario. Es importante aclarar que se incluyen las emisiones asociadas a la gestión de los residuos, independientemente de si esta ocurre dentro o fuera de los límites de la ciudadela. Las emisiones asociadas al sector del manejo del agua representan tan solo el 4% del total, las cuales se asocian principalmente por al uso de energía en la potabilización y el tratamiento del agua. Al igual que para el sector de residuos, las emisiones relacionadas con la distribución del agua potable y el manejo del agua residual se involucran independientemente de si estas se generan dentro o fuera de los límites de Ciudad Verde.

Por otro lado, las emisiones vinculadas al sector de energía son cero debido a que no hay generación de energía en la ciudadela y las emisiones por el uso de energía se incluyen en otros sectores. El sector de ecología urbana no reporta emisiones, por el contrario, genera captura de carbono por parte de la vegetación. La tendencia anual de las emisiones totales responde esencialmente al cambio en la población de Ciudad Verde y al aumento esperado del PIB per cápita. Las emisiones per cápita estimadas varían entre 0.5 y 0.92 tCO_2-eq/año. Para el año 2018 se estimaron en 0.92 ton CO_{2eq} / per cápita debido a las emisiones por los procesos constructivos de unidades residenciales. Por este motivo, en el año 2024, una vez se ha construido la totalidad de viviendas en Ciudad Verde, las emisiones se reducen a 0.50 ton CO_{2eq} / per cápita.

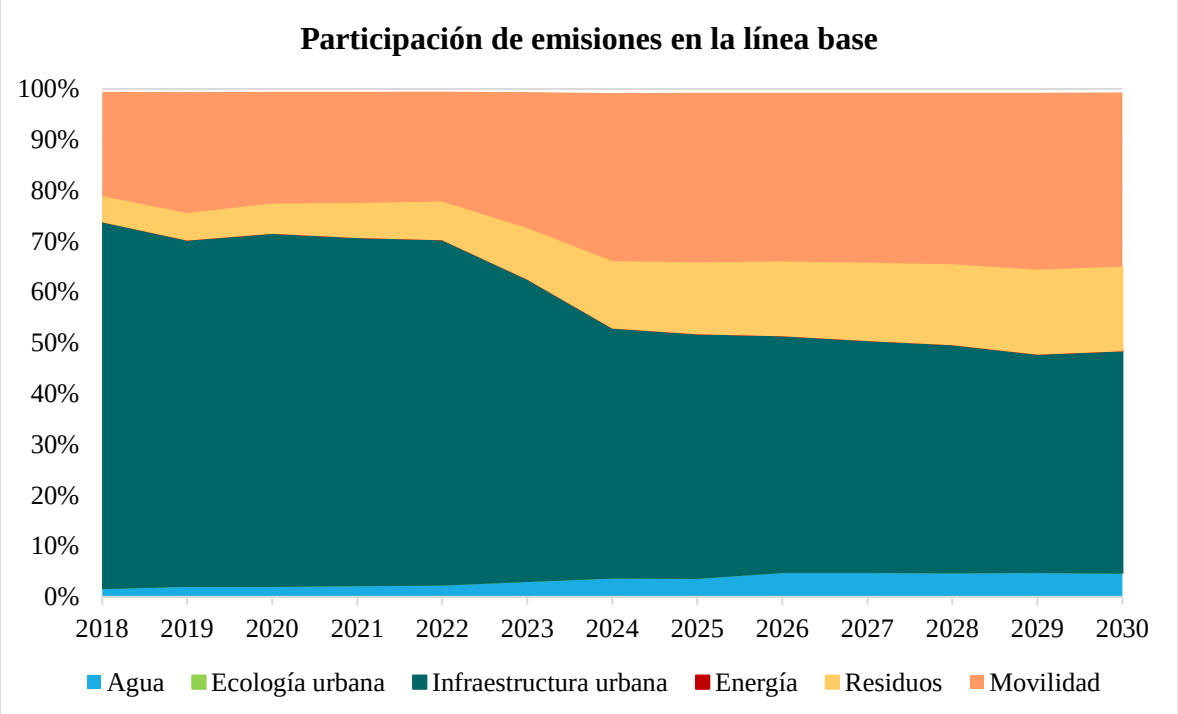


Figura 54. Participación de los sectores en la línea base - clasificación principal

Los valores de emisiones de CO_{2eq} per cápita estimados para Ciudad Verde son bajos si se compara con el estimado para la línea base de la contribución nacional determinada (NDC) de Colombia (i.e., 4.9 tCO_2-$_{eq}$/año). A su vez, reportes para ciudades latinoamericanas siguiendo protocolos del IPCC incluyen emisiones en un rango de 1.0 a 33.4 ton CO_{2eq} / per cápita, para Tuluá (Colombia) y San Luis de Potosí

(México) respectivamente [90], donde las variaciones en las emisiones per cápita dependen de las actividades económicas en la ciudad, así como de los factores empleados de acuerdo con la información disponible. Particularmente, para el caso de Bogotá en los años 2008 y 2012 se reportaron valores de 2.28 y 1.68 ton CO_{2eq} / per cápita [91]. Adicionalmente, estimaciones de acuerdo con la metodología GPC (Protocolo Global para Inventarios de Emisión de Gases de Efecto Invernadero a Escala Comunitaria), para la región de Latinoamérica establecen valores de 1.3 a 10.2 ton CO_{2eq} / per cápita para Salvador (Brasil) y Río Grande (Argentina) respectivamente [90]. Si bien una comparación directa no es posible, estos valores son generalmente más altos que las emisiones per cápita obtenidas para Ciudad Verde. Lo anterior debido a que no se incluyen los mismos sectores y/o subsectores que en estos inventarios. Particularmente, Ciudad Verde es un desarrollo urbano que no posee industria, ni actividad agrícola o ganadera, por lo que las emisiones per cápita son más bajas.

La Figura 55 presenta las emisiones estimadas para la línea base en Ciudad Verde, entre el 2018 y el 2030, para la clasificación alternativa. Se observa que el sector de energía, específicamente la demanda de energía genera la mayor contribución a las emisiones. En comparación con la clasificación sectorial, en la que no se reportan emisiones por parte del sector, en esta clasificación las emisiones asociadas representan el 68% de las totales. Se incluyen emisiones asociadas a la producción y el transporte de servicios (i.e., gestión de los residuos, distribución del agua, recolección y tratamiento de las aguas residuales y movilidad) y de productos como los insumos de construcción. No se contabilizan las emisiones asociadas a la producción y el transporte de otros productos importados a la ciudadela.

Adicionalmente, el 21% de las emisiones están asociadas al sector IPPU y el 11% al sector de residuos. En comparación con el Inventario Nacional de GEI, el sector AFOLU no genera emisiones. Esto es debido a que en Ciudad Verde no hay emisiones asociadas, por ejemplo, a la agricultura. Adicionalmente, desde el año 2024 se observa una disminución de las emisiones asociadas al sector IPPU. Lo anterior debido a que se tiene proyectado finalizar la construcción de la mayoría de la infraestructura que compone la ciudadela en ese año. Ya que no existe industria en Ciudad Verde, las emisiones de este sector después del 2024 no son tan significativas. Como se había mencionado anteriormente, la tendencia anual de las emisiones responde principalmente a la variación de la población y al aumento esperado del PIB per cápita.

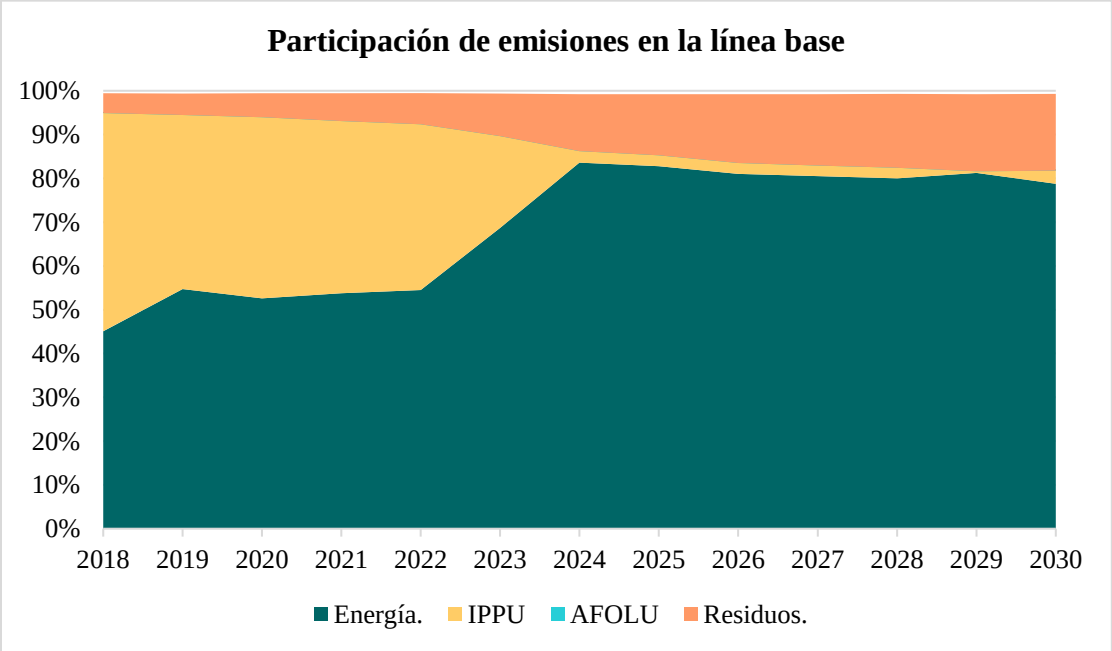


Figura 55. Participación de los sectores en la línea base - clasificación alternativa

6.3. Medidas de mitigación y adaptación

De acuerdo con los resultados obtenidos en la encuesta de Ciudad Verde y las fuentes de emisión identificadas en la estimación de la línea base, se proponen medidas para la mitigación y adaptación desde cada sector que, en algunos casos, también implican impactos en otros sectores. Algunas de las medidas propuestas tienen efectos adicionales sobre el bienestar de los habitantes del macroproyecto de vivienda.

La tasa de descuento empleada para los análisis de costo-eficiencia de las medidas propuestas fue de 9%, el año base fue 2019 y la divisa utilizada dólares de 2019 considerando una tasa de cambio de 3,281.09 COP/USD.

6.3.1. Ecología urbana

Con lo evidenciado, tanto en la medición de indicadores, como en las encuestas realizadas en Ciudad Verde, los espacios verdes no son suficientemente funcionales y diversos, sobre todo teniendo en cuenta la densidad de población que se espera una vez se finalice el proyecto. A ello contribuye asimismo el hecho de que la siembra de árboles y el paisajismo se realizarán al final de la construcción, por lo cual su mantenimiento y cuidado no están garantizados, como se evidencia que ocurre actualmente. Con lo anterior, existe en riesgo de que a futuro se busque reemplazar la cobertura vegetal con materiales duros para así no tener estas preocupaciones.

Para mejorar la calidad de vida de los habitantes de Ciudad Verde, aumentar la oferta de servicios ecosistémicos y las posibilidades de permanencia de los espacios verdes, se puede buscar aumentar la naturalidad de estos. La siembra de más árboles y de más especies en todos los espacios, sin perder la función social de éstos. Adicionalmente, se puede buscar que espacios como el Parque de la Niebla y las zonas protegidas tengan funciones principalmente ecosistémicas, mientras que los parques y alamedas asuman las funciones sociales.

Con respecto a los elementos de estructura ecológica principal (áreas protegidas) en Ciudad Verde se propone una estrategia de restauración y consolidación. Para esto, se parte de un análisis del contexto en el cual se encuentra Ciudad Verde respecto a la EEP del municipio de Soacha. Así las cosas, la consolidación de la Estructura Ecológica Principal aparece como uno de los objetivos para el Sistema Ambiental y Biofísico, Gestión del Riesgo y Cambio Climático en el proyecto de acuerdo del POT de Soacha. Se busca incorporar a la EEP las áreas de amenaza o riesgo no mitigable como áreas de protección. El POT define la EEP según el decreto 3600 de 2007 como *"Conjunto de elementos bióticos y abióticos que dan sustento a los procesos ecológicos esenciales del territorio, cuya finalidad principal es la preservación, conservación, restauración, uso y manejo sostenible de los recursos naturales renovables, los cuales brindan la capacidad de soporte para el desarrollo socioeconómico de las poblaciones"*. Dentro de la EEP se identifican el humedal Tibanica, el canal Tibanica y la ronda del río Soacha que tienen relación con el proyecto Ciudad Verde.

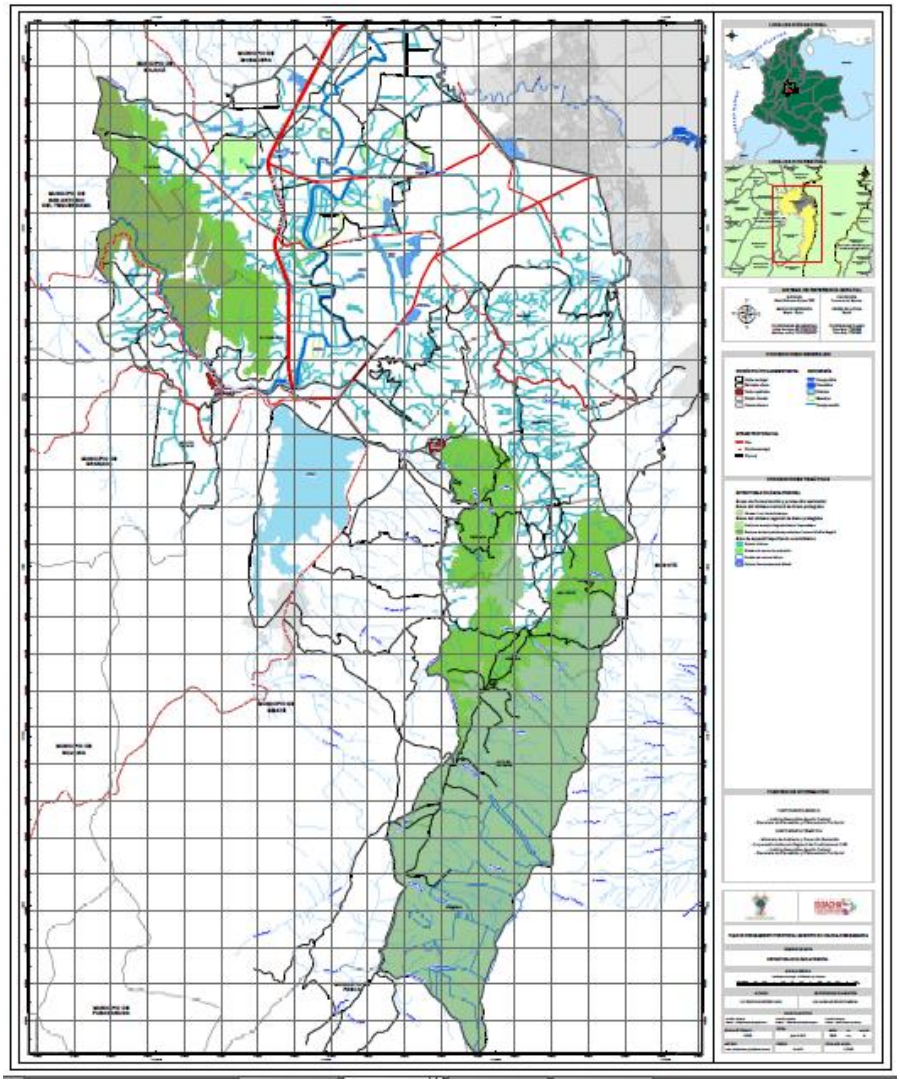


Figura 56. Estructura Ecológica Principal del municipio de Soacha.
Fuente: [1]

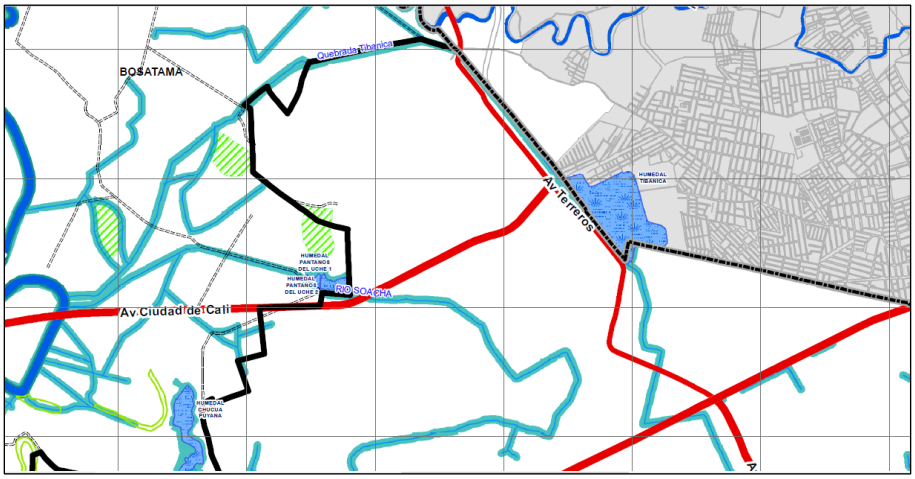


Figura 57. EEP municipio de Soacha en el contexto de ciudad verde
Fuente: [1]

La estructuración e implementación de estas medidas, debe tener en cuenta el criterio de multifuncionalidad de la infraestructura verde que se ve reflejado en las preferencias de los habitantes de Ciudad Verde. También se resalta la importancia de la participación y retroalimentación de las comunidades en este proceso. Cabe también aclarar, que, si bien actualmente Ciudad Verde cuenta con una baja cobertura arbórea, los desarrolladores deben realizar una compensación forestal por los árboles aprovechados para la construcción del proyecto, y continuar con el diseño paisajístico de los diferentes espacios.

Uno de los supuestos importantes para la estimación de la captura de carbono, es el cambio lineal en el almacenamiento de carbono a lo largo del tiempo, lo que tiende a subvalorar el carbono secuestrado dada la tendencia no linear que tiene el carbono. Es decir una tasa es más alta en los primeros años y más baja en los siguientes [92].

La "Estrategia de restauración y consolidación de la infraestructura verde y la Estructura Ecológica Principal", vista como medida de mitigación de CO_2, es complementaria con medidas como la instalación de techos verdes y las propuestas desde el componente de SUDS. Asimismo, el producto del compostaje de residuos orgánicos resulta en un insumo para las actividades de siembra y mantenimiento tanto de plantaciones forestales, como por ejemplo de huertas urbanas que complementen la funcionalidad socio-ecológica de los espacios verdes.

Sobre la costo-eficiencia de estas medidas, vale la pena recalcar que, en las fichas de las medidas estas se estiman únicamente para 10 años, no obstante, esta mejora significativamente si se tiene en cuenta el tiempo en el cual la captura de CO_2 es significativa, que puede ser de hasta 50 años.

- ***Medida 1: Restauración ecológica de zonas verdes de estructura ecológica principal***

La evaluación preliminar de la Estrategia de restauración se enfoca en el Cerro de la Chucuita, o Parque de Niebla de Ciudad Verde. Para esto, se tiene en cuenta el costo de reforestación por hectárea que incluye el establecimiento y tres años de mantenimiento, y una densidad de siembra de reforestación protectora de 1600 individuos por hectárea, datos obtenidos de la Dirección de Gestión del Ordenamiento Ambiental y Territorial de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, Autoridad Ambiental con jurisdicción en el municipio de Soacha. Es importante considerar que estos costos no incluyen compra de terreno y pueden variar considerablemente debido a condiciones específicas y las características de los lugares de siembra, como la calidad del suelo, requerimiento de riego, estabilización de terreno entre otras.

Tabla 70. Restauración ecológica de zonas verdes

Medida 1:	Restauración ecológica de zonas verdes
Categorización:	Ecología Urbana/Cobertura del suelo/ Infraestructura verde y la Estructura Ecológica Principal
Categorización alternativa:	Ecología Urbana/Cobertura del suelo
Tipo de medida:	Mitigación y adaptación
Descripción general: A nivel general, la medida se enfoca en acciones que permitan mejorar la resiliencia climática, la capacidad de mitigación de GEI, y a su vez el bienestar de la población que se beneficia de los diferentes servicios ecosistémicos que proveen los espacios verdes urbanos. Esto, se fundamenta y articula con una de las líneas estratégicas de la Política Nacional de Cambio Climático [21], denominada *"Manejo y conservación de ecosistemas y sus servicios ecosistémicos para el desarrollo bajo en carbono y resiliente al clima.* Para la implementación de esta medida, se evalúa como actividad principal la restauración ecológica del Parque de la Niebla mediante el establecimiento de una plantación forestal protectora. No sin aclarar que en el diseño	

paisajístico y de espacio público se debe tener en cuenta la multifuncionalidad (social y ecológica) de este espacio.	
Adaptación	
Reducción de temperatura (°C):	8 ºC
Mitigación	
Mitigación (tCO_{2}-eq):	6,606
Costo-eficiencia (USD/tCO_{2}-eq):	7.47
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_{2}-eq):	N/A
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_{2}-eq):	Residuos/Gestión de residuos: Emisiones por gestión podas.
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Urbanizador.
Indirecto	Administración pública
Factibilidad	
Financiera	Media Barreras: Inversión inicial alta
Técnica	Alta Se cuenta con experiencia previa en el país para su construcción y mantenimiento.
Regulatoria	Alta Existen elementos en las leyes y regulaciones vigentes que permiten su implementación.
Social	Alta La medida puede tener una aceptación alta, mejora la calidad de vida y no genera riesgos para la población
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	Aumento en el índice de naturalidad Adaptación al cambio climático Mejoramiento de la calidad de hábitat para fauna Mejoramiento de los Servicios Ecosistémicos: Regulación hídrica, de sedimentos y nutrientes Bienestar y salud de la población Calidad paisajística/escénica

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de esta medida, la captura de CO_2 (emisiones negativas) de acuerdo con estimativos realizados según las directrices del IPCC 2006 y 2019, aumentaría en 6.606 t CO2 por año. Asimismo, el aumento de la cobertura vegetal disminuiría el efecto isla de calor en este espacio en alrededor de 8ºC, lo que a pesar de no resultar para este caso en un ahorro energético debido a las condiciones climáticas de Soacha, generaría para el caso de Ciudad Verde un mejor confort para realizar actividades en esta zona, y podría relacionarse también al mejoramiento del confort térmico en interiores de las viviendas, si se combina además esta medida con el establecimiento de techos verdes (medida propuesta desde el sector de SUDS).

- ***Medida 2: Plantación de árboles en zonas verdes.***

Si bien el megaproyecto de vivienda de Ciudad Verde se encuentra ya constituido en su mayoría, y como se presentó anteriormente en los resultados de los indicadores evaluados, cuenta con una oferta de espacios ambientales, que, en términos de accesibilidad cumple con los deseables. Se identifica como medida para el mejoramiento de estos espacios la plantación de árboles en zonas verdes crear una red multifuncional efectiva. Esta medida que se sintetiza en la Tabla 71 tiene un costo-eficiencia de 7.19 USD/tCO_{2}-eq, teniendo en cuenta la captura de carbono durante un periodo de 10 años.

Tabla 71. Plantación de árboles en zonas verdes.

Medida:	Plantación de árboles en zonas verdes
Categorización:	Ecología Urbana/Cobertura del suelo/ Infraestructura verde y la Estructura Ecológica Principal
Categorización alternativa:	Ecología Urbana/Cobertura del suelo
Tipo de medida:	Mitigación y adaptación
Descripción general: Para la implementación de esta medida se propone la plantación de 40.000 árboles en los parques y demás parte de la Infraestructura verde. El año de plantación inicial se asume que sería el 2020, y se incluyen tres mantenimientos anuales. Cabe resaltar que lo anterior consiste en una aproximación que no aborda el diseño paisajístico y de espacio público, para lo cual se debe tener en cuenta la multifuncionalidad (social y ecológica) de estos espacios. Es decir, además de los criterios ecológicos encaminados a la consolidación de la infraestructura verde, que lo "gris" que hace parte de lo "verde" como por ejemplo los senderos peatonales, canchas deportivas y espacios de juego sean permeables. De igual manera involucrar las preferencias de la población, teniendo en cuenta por ejemplo que somo resultado de la encuesta realizada en "Ciudad Verde" se identificó que las personas además de contar con espacios más naturales, desean contar con parques para la tercera edad, parques deportivos, parques infantiles, jardines y huertas comunales.	
Adaptación	
Reducción de temperatura (°C):	8 ºC
Mitigación	
Mitigación (tCO_2eq):	11,010
Costo-eficiencia (USD/tCO_2eq):	7.19
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2eq):	N/A
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2eq):	Residuos/Gestión de residuos: Emisiones por gestión podas.
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Urbanizador.
Indirecto	Administración pública
Factibilidad	
Financiera	Media Barreras: Inversión inicial alta
Técnica	Alta Se cuenta con experiencia previa en el país para su construcción y mantenimiento.
Regulatoria	Alta Existen elementos en las leyes y regulaciones vigentes que permiten su implementación.
Social	Alta La medida puede tener una aceptación alta, mejora la calidad de vida y no genera riesgos para la población
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	Aumento en el índice de naturalidad Adaptación al cambio climático Mejoramiento de la calidad de hábitat para fauna Mejoramiento de los Servicios Ecosistémicos: Regulación hídrica, de sedimentos y nutrientes Bienestar y salud de la población Calidad paisajística/escénica

Fuente: Elaboración propia.

6.3.2. Manejo integrado del agua

- **Descripción de las medidas**

La gestión del agua urbana tanto en nuevos desarrollos como en desarrollos existentes debe tener niveles aceptables de prestación de servicios públicos, no sobrecargar la infraestructura existente, tener un impacto mínimo en el medio ambiente y ser, al mismo tiempo, social y económicamente aceptable [93]. De esta manera, las medidas de mejora seleccionadas están enfocadas, en primer lugar, en el manejo de la demanda de agua potable. A su vez, consideran el agua residual y el agua pluvial como un recurso y pretenden emular el ciclo hidrológico previo al desarrollo urbano. A continuación, se describen dichas medidas y los resultados obtenidos.

Tabla 72. Medida 1 - Uso de equipos eficientes

Medida 1:	Uso de equipos eficientes
Categorización:	Edificación / Consumo de agua / Equipos eficientes
Categorización alternativa:	Energía / Demanda de energía
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: Los equipos eficientes permiten disminuir el consumo de agua potable mediante su uso, debido a que reducen su caudal de operación y mejoran la eficiencia del sistema. Entre estos se encuentran los grifos ahorradores, los inodoros de doble descarga y las duchas de bajo flujo. El desempeño de estos sistemas varía de acuerdo al usuario [94]. Por ejemplo, en algunos casos la reducción en el caudal de un equipo no siempre es equivalente a la reducción en el consumo y características como el género pueden influir en el ahorro de agua [94]. Las medidas seleccionadas para generar un ahorro de agua potable en las unidades residenciales corresponden a: (1) ducha ahorradora, (2) sanitario de baja descarga, (3) lavaplatos con aireador y (4) lavamanos con aireador. Adicionalmente, se evalúa el ahorro potencial para una lavadora más eficiente de acuerdo con un esquema paulatino de reemplazo que inicia en el año 2021. Para los otros equipos, se realiza un análisis que incluye la implementación en nuevas unidades residenciales a partir del año 2021 y el reemplazo completo de estos en el año 2023, en el cual se habrán construido y entregado la totalidad de las viviendas. Se proponen dos escenarios para evaluar la implementación de estos equipos. El primero corresponde a implementar solo una de las medidas mientras que, el segundo, a la instalación de los equipos en conjunto en los distintos tipos de vivienda excluyendo la lavadora. El ahorro potencial se establece dependiendo del tipo de vivienda (i.e. VIP, VIS y tope VIS).	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	Ahorro total: 9’622,506.6 Ducha: 2’660,521.0 Sanitario: 1’794,618.0 Lavaplatos: 1’824,817.0 Lavamanos: 436,818.0 Lavadora: 2’905,731.6 Vivienda VIP: Ducha: 818,305.0 Sanitario: 692,561.0 Lavaplatos: 561,288.0 Lavamanos: 144,900.0 Vivienda VIS: Ducha: 1’103,608.0 Sanitario: 669,727.0 Lavaplatos: 756,954.0 Lavamanos: 195,303.0 Vivienda tope VIS: Ducha: 738,608.0

	Sanitario: 432,330.0 Lavaplatos: 506,575.0 Lavamanos: 96,615.0
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	Mitigación total: 12,516.6 Ducha: 3,068.0 Sanitario: 2,072.8 Lavaplatos: 2,104.3 Lavamanos: 503.8 Lavadora: 4,767.6 Vivienda VIP: Ducha: 946.5 Sanitario: 800.9 Lavaplatos: 649.1 Lavamanos: 167.5 Vivienda VIS: Ducha: 1,272.0 Sanitario: 773.2 Lavaplatos: 872.5 Lavamanos: 225.2 Vivienda tope VIS: Ducha: 849.5 Sanitario: 498.7 Lavaplatos: 582.7 Lavamanos: 111.1
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	Costo-eficiencia total: Ducha: -$63.9 Sanitario: $2,172.8 Lavaplatos: -$568.8 Lavamanos: $548.5 Lavadora: $2,695.8 Vivienda VIP: Ducha: $112.8 Sanitario: $2,210.5 Lavaplatos: -$539.1 Lavamanos: $537.9 Vivienda VIS: Ducha: -$104.0 Sanitario: $2,328.5 Lavaplatos: -$583.7 Lavamanos: $396.2 Vivienda tope VIS: Ducha: -$202.7 Sanitario: $1,875.6 Lavaplatos: -$581.5 Lavamanos: $872.9
Incertidumbre estimación:	La incertidumbre asociada se categoriza como media. La mayoría de los procesos de reducción de emisiones se consideran en el marco de modelación. Los costos y del desempeño de los equipos se estiman a partir de información secundaria proveniente de contextos similares en el país.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	*Sector Infraestructura Urbana:* Lavadora: 2512

Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	0
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Propietarios, constructores
Indirecto	Gobierno Nacional (p.ej., Ministerio de Vivienda)
Factibilidad	
Financiera	El reemplazo de la ducha y el uso de un reductor de caudal en el lavaplatos tienen una factibilidad alta, dado los ahorros en el consumo permite recuperar la inversión inicial durante el periodo de tiempo analizado. Particularmente, la inversión para el aireador del lavaplatos es baja (i.e. menor a 10 USD en cada vivienda), lo que hace que su implementación tenga una mayor factibilidad financiera. Por otro lado, la ducha requiere una inversión inicial más alta para la adquisición del producto e instalación, porque lo que su factibilidad financiera es mayor si se emplean en nuevas viviendas. En este sentido, como todas las viviendas VIP del proyecto se encuentran construidas, el ahorro en el consumo resulta insuficiente para compensar el costo. En cuanto al lavamanos, si bien la inversión inicial es baja, el ahorro esperado en el consumo de agua potable también lo es. Por lo que su factibilidad financiera es baja en todos los tipos de vivienda. A su vez, para el sanitario y su instalación se requiere una inversión inicial alta que no es compensada totalmente durante el periodo de tiempo considerado. Si bien, esto es una limitante para su uso en viviendas ya construida, su implementación puede tener una mayor factibilidad financiera en viviendas nuevas puesto que el costo de los sanitarios evaluados es similar al costo de los sanitarios empleados actualmente en viviendas de estrato 3 y 4 [95]. La lavadora, también presenta una factibilidad financiera baja, dado que los ahorros potenciales en energía y agua no compensan el costo del producto en el corto plazo.
Técnica	La factibilidad técnica se califica como alta, pues existe experiencia previa en su construcción, instalación y mantenimiento. En Colombia están presentes diversos proveedores de estas tecnologías de bajo consumo. Adicionalmente, el desempeño de estos equipos en los diferentes tipos de vivienda fue evaluado en el estudio realizado por el BEA "Bases técnicas para el Desarrollo del Protocolo de Implementación de la Resolución 549 de 2015", que define unas metas de obligatorio cumplimiento para el ahorro de energía y agua en edificaciones.
Regulatoria	La factibilidad regulatoria se califica como alta, debido a que existe normativa que promueve su implementación. Entre esta se destaca la Resolución 0549 de 2015, la NTC 1500 "Código colombiano de instalaciones hidráulicas sanitarias" del ICONTEC y la NS-128 "Lineamientos generales para diseño y construcción de instalaciones hidrosanitarias internas y sistemas contra incendio" de la EAB, que establece las recomendaciones para la selección y utilización de dispositivos ahorradores de agua.
Social	La factibilidad social se califica como alta ya que la medida tiene una aceptación alta por parte de la comunidad y no genera ningún riesgo para la misma.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	*Oferta de recursos renovables naturales:* Positivo El uso de equipos eficientes genera un ahorro en el agua consumida (que varía entre el 15% y el 50% según el elemento implementado) y, por ende, aumenta la disponibilidad de recursos hídricos.

Tabla 73. Medida 2 - Sistema de reúso de aguas grises

Medida 2:	Sistema de reúso de aguas grises
Categorización:	Edificación / Consumo de agua / Sistemas de reúso y aprovechamiento
Categorización alternativa:	Energía / Demanda de energía

Tipo de medida:	Adaptación
Descripción general: Los sistemas de reúso de aguas grises se utilizan principalmente para reemplazar el agua potable destinada a usos no potables como la descarga de sanitarios, el lavado de pisos y el riego de jardines. Estos representan una alternativa para manejar las aguas residuales urbanas y pueden generar entre el 10% y el 50% de ahorro de agua potable en las edificaciones [96]. Están compuestos por un sistema que separa las aguas grises dentro de las edificaciones, un sistema de tratamiento del agua residual y un tanque de almacenamiento para el agua tratada. Debido a que el agua gris se origina de diferentes fuentes (p.ej. agua de la ducha, lavadora y lavamanos), la concentración de contaminantes y el tratamiento requerido varía según la fuente. Adicionalmente, entre los sistemas de tratamiento más utilizados se encuentran los sistemas de filtración, las membranas y las paredes verdes [97]. Se propone implementar un sistema de reciclaje de aguas grises en todas las viviendas residenciales a partir del año 2023. Las fuentes y usos de agua se establecieron a partir de los usos residenciales preexistentes y potenciales de agua gris en el área identificados a partir de una encuesta realizada en Ciudad Verde. Las fuentes evaluadas incluyen ducha, lavamanos y lavadora. Los usos considerados corresponden a sanitario, lavadero y lavadora. La costo-eficiencia presentada corresponde a un sistema con capacidad de 250 L/ vivienda en el cual se empleen todas las fuentes y usos mencionados. Para la cuantificación de los efectos se considera que actualmente hay un porcentaje de aproximadamente 20.97% de agua gris reutilizada y agua lluvia aprovechada en las viviendas y que el sistema propuesto debe suplir esta demanda de agua.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	2’773,006.0
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	Uso total: 11’512,067.0 Uso adicional: 2’773,006.0
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	3,648.02
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	$25,074.9
Incertidumbre estimación:	La incertidumbre asociada se categoriza como media. La mayoría de los procesos de reducción de emisiones se consideran en el marco de modelación. La estimación de los costos y del desempeño del sistema se estima a partir de información secundaria proveniente de contextos similares en el país y de contextos internacionales. Adicionalmente, la cuantificación del agua potable a reemplazar por agua gris se aproxima mediante los resultados obtenidos en la encuesta realizada a la población de Ciudad Verde.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	0
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	*Sector Infraestructura Urbana:* 45.3
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Propietarios, constructores
Indirecto	Gobierno Nacional (p.ej., Ministerio de Vivienda)
Factibilidad	
Financiera	Se califica como baja debido a la relación entre los costos y los beneficios económicos. La inversión inicial por vivienda es alta y tiene un costo de operación asociado al uso de energía. Los potenciales ahorros de agua no compensan estos gastos durante el periodo analizado puesto que actualmente una parte del agua gris generada es reutilizada de forma manual. Esto significa que se debe incurrir en gastos adicionales para llevar a cabo un proceso que no tiene costo en la actualidad.
Técnica	La factibilidad técnica se califica como media, pues existe experiencia previa en pilotos para su construcción y mantenimiento (p.ej., proyecto casa autosostenible Vrissa y los proyectos desarrollados por la iniciativa “Uso de aguas superficiales, lluvias y reúso del agua” de la EAB). En la actualidad, en el mercado hay disponibles tecnologías prefabricadas para el reúso de aguas grises, pero no se consiguen en Colombia.

Regulatoria	La factibilidad técnica se califica como media. Entre la normativa relevante para la implementación de estos sistemas se encuentra la Resolución 1207 del 2014, en la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. Adicionalmente, se destaca la Ley 373 de 1997, la cual menciona disposiciones acerca del reúso obligatorio del agua. A pesar de que existe normativa que incentiva su implementación, aún es necesaria una reglamentación respecto al desempeño que dichos sistemas deben tener en cuanto al tratamiento del agua gris y los usos que se le puede dar en edificaciones.
Social	La factibilidad técnica se califica como media, pues la medida puede tener una aceptabilidad moderada o baja por parte de la población. En la actualidad, aún existen barreras socioculturales para su implementación (p.ej., percepción de riesgos a la salud y altos costos). Específicamente, algunos habitantes que no reúsan el agua en Ciudad Verde manifestaron preocupaciones por la percepción de higiene (15%) y los posibles riesgos a la salud (4%) que su uso podría ocasionar. Otra fracción de la población manifestó que utilizaba agua gris sin ningún tipo de tratamiento en su hogar. La implementación de esta medida en dichos hogares puede generar una mejora en la calidad de vida de las personas.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	*Oferta de recursos renovables naturales:* Positivo La medida genera un ahorro en el agua potable consumida y, por ende, aumenta la disponibilidad de recursos hídricos.
	Equidad: Positivo El uso de un sistema de reúso de aguas grises en el hogar puede mejorar el acceso al recurso hídrico, considerando el alto costo del servicio de distribución de agua potable en Ciudad Verde (el cual, en promedio, representa el 30% de los ingresos libres del hogar).

Tabla 74. Medida 3 - Sistema de reúso de aprovechamiento de aguas grises

Medida 3:	Sistema de reúso de aprovechamiento de aguas lluvias
Categorización:	Edificación / Consumo de agua / Sistemas de reúso y aprovechamiento
Categorización alternativa:	Energía / Demanda de energía
Tipo de medida:	Adaptación

Descripción general:

Los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias permiten recolectar el agua lluvia que cae sobre una superficie impermeable, para disponerla para usos no potables. Estos sistemas pueden asegurar un suministro de agua independiente al sistema de distribución y, si se separa el agua del primer lavado, tienen una calidad aceptable la mayoría de las veces [98]. Algunos estudios han estimado ahorros de agua potable de 8.5% al 64% cuando se emplean aguas lluvias en viviendas [99], [100]. Otros estudios han establecido ahorros potenciales de agua potable de 25.2% a 41.9% en sistemas que incluyen usos de aguas lluvias y aguas grises [100], [101]. En general, este ahorro varía de acuerdo con los regímenes de precipitación, el tamaño del tanque de almacenamiento, así como los usos que los habitantes de una vivienda estén dispuestos a darle al agua lluvia y gris. Estos sistemas están compuestos, en primer lugar, por un sistema de captación. El área de captación del agua lluvia, generalmente, corresponde a los techos de las edificaciones. Adicionalmente, poseen un sistema de transporte, que conduce el agua recolectada hasta un tanque de almacenamiento, y un filtro o algún sistema de pretratamiento que trata el agua antes de su ingreso al tanque. Por último, se componen de un sistema de distribución de agua hasta su uso final.[100], [101].

Se propone la implementación de sistemas descentralizados para el aprovechamiento de agua lluvia cuya operación iniciaría en el año 2023. Se evaluó el uso de agua lluvia proveniente de los techos en la lavadora, lo cual se consideran como uso factible de acuerdo con los resultados de la encuesta. Los sistemas cuentan con capacidad de tratamiento de 5 m^3 diarios por cada tres torres en los conjuntos residenciales. Para la cuantificación de los efectos se considera que actualmente hay un porcentaje de 0.49% de agua lluvia aprovechada en las viviendas. No se considera el reemplazo del agua gris que es reusada actualmente puesto que el volumen de agua lluvia en el área resulta insuficiente para esto.

Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	700,033.0
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	844,700.0
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	Uso total: 844,700.0 Uso adicional: 700,033.0
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	646.9
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	$3,764.2
Incertidumbre estimación:	La incertidumbre asociada se categoriza como media. La mayoría de los procesos de reducción de emisiones se consideran en el marco de modelación. La estimación de los costos se estima a partir de información secundaria proveniente de contextos similares en el país y de contextos internacionales. Adicionalmente, la cuantificación del agua potable a reemplazar por agua lluvia se aproxima mediante los resultados obtenidos en la encuesta realizada a la población de Ciudad Verde.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	0
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	*Sector Infraestructura Urbana:* 6.6
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Propietarios, constructores
Indirecto	Gobierno Nacional (p.ej., Ministerio de Vivienda)
Factibilidad	
Financiera	Se califica con una factibilidad financiera baja puesto que la inversión requerida para la instalación y posterior operación del sistema no es compensada por el ahorro en el uso de agua potable. Si bien, la implementación del sistema incrementa la cantidad de agua lluvia empleada a nivel residencial el volumen potencial de agua potable que se ahorraría es muy bajo.
Técnica	La factibilidad técnica se califica como alta, pues existe experiencia previa para su construcción y mantenimiento. En la actualidad, en Colombia hay disponibles tecnologías prefabricadas para el aprovechamiento de aguas lluvias en edificaciones Así mismo, en usos del suelo comercial y dotacional se han implementado diversos sistemas para su aprovechamiento.
Regulatoria	La factibilidad técnica se califica como media. Entre la normativa relevante para la implementación de estos sistemas se encuentra el Decreto 1076 de 2015, en el cual se mencionan disposiciones sobre la concesión del agua lluvia para su uso, y la Ley 373 de 1997, la cual menciona disposiciones acerca del reúso obligatorio del agua. A pesar de que existe normativa que incentiva su implementación, aún es necesaria una reglamentación respecto al desempeño que estos sistemas deben tener en cuanto al tratamiento del agua lluvia y los usos que se le puede dar en edificaciones.
Social	La factibilidad social se califica como media, pues la medida puede tener una aceptabilidad moderada o baja por parte de la población. En la actualidad, aún existen barreras socioculturales para su implementación (p.ej., percepción de riesgos a la salud y altos costos). Específicamente, algunos habitantes que no aprovechan el agua en Ciudad Verde manifestaron preocupaciones por los riesgos a la salud (4%) y el aumento en los costos (7%) que su uso podría ocasionar. Otra fracción de la población manifestó que estaría dispuesta a utilizar el agua lluvia tratada para regar jardines (29%), lavar el piso de las unidades residenciales (39%) y descargar el sanitario (83%).
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	*Oferta de recursos renovables naturales:* Positivo La medida genera un ahorro en el agua potable consumida y, por ende, aumenta la disponibilidad de recursos hídricos.

Tabla 75. Medida 4 - Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

Medida 4:	Uso de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)
Categorización:	Agua / Manejo de la escorrentía / SUDS
Categorización alternativa:	Energía / Demanda de energía
Tipo de medida:	Adaptación
Descripción general: Los SUDS son sistemas alternativos de drenaje que hacen parte de la infraestructura utilizada para el manejo de aguas pluviales urbanas. Su principio básico es el de mitigar los cambios en la hidrología por el desarrollo urbano, mediante la emulación del ciclo hidrológico previo a la intervención, con el objetivo de generar un régimen de flujo más natural. Las tipologías de SUDS están diseñadas para reducir los efectos de las inundaciones por medio de la retención, detención, y/o infiltración de la escorrentía. Así mismo, permiten mejorar la calidad de la escorrentía que drena hacia los cuerpos de agua receptores, incentivar el reúso de agua y generar amenidad y paisajismo. Estas estructuras son complementarias al sistema de drenaje convencional y su eficiencia en la reducción de escorrentía varía entre el 30% y el 90% [102]. Algunas de las tipologías que se pueden encontrar y que fueron seleccionadas para su evaluación son: alcorques inundables, cuenca seca de drenaje extendido, cuentas verdes, zonas de bioretención, pondajes húmedos, pavimentos permeables, zanjas de infiltración, humedales construidos y cuencas de infiltración. Las zonas urbanas de Ciudad Verde se estudian para priorizar y establecer áreas para la implementación de SUDS de acuerdo con los beneficios relacionados con los servicios ecosistémicos de provisión, regulación y culturales, así como a los requerimientos de costos y mantenimiento de las tipologías consideradas. Específicamente, se definen las áreas que presentan mayor déficit de servicios ecosistémicos y dichas áreas se priorizan para la implementación de SUDS. En seguida, se evalúa el espacio público para establecer qué áreas pueden proveer mayor cantidad de servicios ecosistémicos. Por último, se definen las tipologías de SUDS recomendadas en el área, las cuales proporcionan los mayores beneficios de acuerdo con las necesidades de la zona. En el Anexo 10. se presenta una descripción detallada de la metodología empleada. Se propone la implementación de diversas tipologías de SUDS en el espacio público, en el año 2023. Para esto, se asume que tanto el espacio público como el espacio privado van a estar completamente desarrollados. Se plantean cuatro escenarios para evaluar la implementación de las tipologías seleccionadas (Ver Tabla 84). Estos varían dependiendo del presupuesto asignado para la construcción y operación de las estructuras. Una vez establecidas las áreas para implementar SUDS, las tipologías específicas y los costos de las mismas, se definió que el área intervenida es 15541.68 m^2. Esta área está cubierta por 11 pondajes húmedos, 9 cunetas verdes y 1 cuenca seca de drenaje extendido.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3/año):	142,756.94
Incremento en la evapotranspiración (mm/día):	0.0026
Escorrentía regulada (m^3):	68,671.56
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	142,756.94
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	Mitigación total: 57.06 Cuenca seca de drenaje extendido: 0.41 Cuneta verde: 22.66 Pondaje húmedo: 33.99
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	Costo-eficiencia total: $ 3,578.72 Cuenca seca de drenaje extendido: $ 5,560.02 Cuneta verde: $ 8,485.18 Pondaje húmedo: $ 283.68
Incertidumbre estimación:	La incertidumbre asociada se categoriza como media. La mayoría de los procesos de captura de carbono y reducción de emisiones se consideran en el análisis. La estimación de la reducción en las emisiones por la disminución en el bombeo de la escorrentía se realiza considerando información primaria mientras que la estimación de la captura de carbono se realiza a partir de información reportada en casos de estudio internacionales. La mayoría de los costos de las tipologías se estiman a partir de información secundaria proveniente de contextos similares en el país.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	*Sector Ecología Urbana:*

	34.60 tCO_2-eq (del 2023 al 2030) 4.32 tCO_2-eq/año
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	0
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Urbanizador, administración pública
Indirecto	Comunidad
Factibilidad	
Financiera	La factibilidad financiera se califica como baja. Esto debido a que la inversión inicial, así como los costos asociados al mantenimiento de las tipologías de SUDS, son altos. Es importante aclarar que no se realizó una valoración económica de los otros beneficios provistos por los SUDS (p.ej. reducción en los requerimientos de mantenimiento de las redes de drenaje convencional y provisión de servicios ecosistémicos socioculturales). Si se asignará un valor económico a los otros beneficios suministrados estos, las medidas seleccionadas tendrían mayor factibilidad financiera.
Técnica	La factibilidad técnica se califica como media, dado que existe experiencia previa en pilotos para su construcción y mantenimiento. Entre los pilotos se destaca el proyecto realizado entre la SDA, la EAB y la Universidad de los Andes, en el cual se construyó una cuneta verde y una cuenca seca de drenaje extendido.
Regulatoria	La factibilidad regulatoria se categoriza como alta, debido a que existe normativa que facilita la implementación de estos sistemas. Entre esta se encuentra el Acuerdo 418 del 2009, la Resolución 6523 de 2011, el decreto 597 de 2018 y la norma NS-166 Criterios para diseño y construcción de SUDS de la EAB.
Social	La factibilidad social se categoriza como media pues, a pesar de que la medida no afecta de manera negativa la calidad de vida de las personas, puede tener moderada o baja aceptación por parte de la población. Según experiencias previas, esto es debido a que el agua de escorrentía se maneja de manera superficial y algunas personas presentan consideran esto como un riesgo o problema.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	*Calidad del agua:* Muy positivo Los SUDS mejoran la calidad de la escorrentía que drena hacia ríos, quebradas y humedales, lo que ayuda a la restauración y conservación de los cuerpos de agua receptores. Esto se realiza mediante procesos de sedimentación, filtración, adsorción, biodegradación, volatilización, entre otros. Entre los contaminantes que se pueden remover mediante la implementación de SUDS se encuentran los sólidos suspendidos totales, DQO, DBO, nutrientes y metales pesados.
	Oferta de recursos renovables naturales: Muy positivo Mediante la implementación de las cunetas verdes y la cuenca seca de drenaje extendido se puede aumentar la recarga de aguas subterráneas y/o el flujo subsuperficial. Adicionalmente, los pondajes húmedos permiten el almacenamiento de agua que está disponible para riego u otros usos no potables.
	Biodiversidad: Positivo Los SUDS representan ventajas significativas relacionadas con la biodiversidad. Por ejemplo, los pondajes húmedos pueden prestar zonas habitables para gran cantidad de especies animales (insectos, reptiles, aves, peces y mamíferos) y flora en general.
	Educación: Positivo Los SUDS representan una oportunidad para empoderar a las comunidades locales para la protección ambiental a través de la educación pública y la participación ciudadana.
	Suelo: Positivo La implementación de algunas tipologías de SUDS puede contribuir al control de la erosión. Adicionalmente, la cobertura vegetal del suelo mejora debido al ingreso de escorrentía y al mantenimiento proyectado

	en las zonas donde se instalan SUDS.

- **Escenarios de mitigación de emisiones y análisis de resultados**

La gestión del agua urbana tanto en nuevos desarrollos como en desarrollos existentes debe, entre otros, tener niveles aceptables de prestación de los servicios públicos de distribución de agua y alcantarillado, no sobrecargar la infraestructura existente, tener un impacto mínimo en el medio ambiente y ser, al mismo tiempo, social y económicamente aceptable. Así pues, las medidas de mejora planteadas se resumen en la Tabla 76. En primer lugar, para el manejo de la demanda de agua potable se analiza la implementación de: (1) equipos eficientes, (2) reúso de aguas grises y (3) aprovechamiento de agua lluvia. Estas medidas permiten mejorar la eficiencia en el uso del agua y disminuir la demanda de agua potable, lo que reduce la presión sobre las fuentes hídricas y la necesidad de incrementar la capacidad de suministro. En un escenario en el que el suministro pueda verse afectado por condiciones ambientales como eventos de sequía o contaminación de las fuentes de agua, la implementación de estas alternativas es particularmente relevante.

En segundo lugar, se consideran los SUDS como medidas para el manejo de la escorrentía mediante un esquema optimizado que tiene en cuenta el desempeño de las tipologías para la maximización de los servicios ecosistémicos y la minimización de los costos de construcción y mantenimiento. Estos esquemas empezarán a operar a partir del 2023, año en el que se proyecta la entrega total de las viviendas. Se seleccionó esta estrategia pues algunos de los impactos adversos de la urbanización y del cambio climático en la hidrología y en la calidad del agua pueden amortiguarse implementando SUDS, ya que se reducen los volúmenes y los caudales pico de escorrentía y su concentración de contaminantes. Adicionalmente, otros efectos causados por el desarrollo urbano, como las islas de calor y la degradación de los ecosistemas urbanos, se pueden atenuar mediante el uso de estas tipologías. En las siguientes secciones se detallan cada una de las medidas evaluadas y la selección de los esquemas de evaluación.

Tabla 76. Medidas de mitigación - Manejo Integrado del Agua

Subsector	**Medida evaluada**		**Esquemas evaluados**
Manejo de la demanda	Equipos eficientes	Ducha	Todas las viviendas Construcciones VIP Construcciones VIS Construcciones tope VIS
		Sanitario	
		Lavaplatos	
		Lavamanos	
		Lavadora	Reemplazo del 50% de las lavadoras en todas las viviendas que posean dicho electrodoméstico. Se plantea su implementación en el año 2021 hasta llegar al 100% en el año 2024
	Reúso de aguas grises	Sistema de 500 l/día	Una vivienda por sistema Dos viviendas por sistema
	Aprovechamiento de agua lluvia	Sistema de 1.5 m^3/día	Un sistema por torre en un conjunto residencial
		Sistema de 5 m^3/día	Un sistema por cada tres torres en un conjunto residencial
			Dos sistemas por cada conjunto residencial

Subsector	Medida evaluada		Esquemas evaluados
Gestión de la escorrentía	SUDS	Cunetas verdes (CV)	De acuerdo con cuatro presupuestos[8]: Sin restricción $ 1,290,797,287.55 $ 2,581,594,575.10 $ 5,163,189,150.20
		Zonas de bioretención (ZB)	
		Alcorques inundables (AI)	
		Cuenca seca de drenaje extendido (CSDE)	
		Zanjas de infiltración (ZI)	
		Pavimentos permeables (PP)	
		Pondajes húmedos (PH)	
		Humedales construidos (HC)	
		Cuencas de infiltración (CI)	

- ***Uso de equipos eficientes***

Se analiza el uso de ducha ahorradora, sanitario de baja descarga, lavaplatos con aireador y lavamanos con aireador para los tres tipos de vivienda de Ciudad Verde. Cada medida se evalúa de forma individual para luego estimar el efecto conjunto. En la Tabla 77 se resume la disminución en el consumo de agua potable y en la descarga de aguas residuales por el uso de cada equipo eficiente. Se observa que la implementación de los equipos eficientes genera un mayor ahorro de agua potable y, por ende, una mayor reducción en la descarga de aguas residuales, en las viviendas tipo VIS. Esto es resultado de que la mayor proporción de vivienda en el proyecto corresponde a vivienda VIS (i.e., 39.5%) y del posible uso de elementos más eficientes en viviendas nuevas VIS a partir del 2021. Adicionalmente, de los equipos seleccionados, la ducha puede generar el mayor ahorro de agua potable y el uso de aireador en el lavamanos tiene el menor potencial de ahorro. En total, se estimó un ahorro de agua potable de 19.5% al cambiar los elementos existentes por los equipos eficientes.

Tabla 77. Disminución en el consumo de agua potable por el uso de equipos eficientes

Desempeño de la medida		Ducha, sanitario, lavaplatos con aireador y lavamanos con aireador Reemplazo en todas las viviendas en el 2023 Uso en viviendas nuevas a partir del 2021			Reemplazo en todas las viviendas desde el 2023 Uso en viviendas nuevas a partir del 2021				Implementación paulatina 2021-2024
		VIP	VIS	Tope VIS	Ducha	Sanitario	Lavaplatos	Lavamanos	Lavadora
Disminución en el consumo de agua potable	m^3	2’217,054	2’752,592	1’774,128	2’660,521	1’794,618	1’824,817	436,818	2’905,732
Reducción de agua residual descargada	m^3	1’884,050	2’317,009	1’507,875	2’261,468	1’525,255	1’550,990	371,221	2’469,880
Porcentaje reducción a nivel residencial	%	4.5%	5.5%	3.6%	5.4%	3.6%	3.7%	0.9%	5.9%

En la Tabla 78 se resume la mitigación resultante por el uso de equipos eficientes. Cabe anotar que la reducción real de emisiones puede ser menor dado que algunos monitoreos realizados sobre equipos eficientes indican que el ahorro real puede variar dependiendo del usuario [94]. De acuerdo con los resultados el uso de aireador en el lavaplatos permite un ahorro significativo de agua con una inversión baja. Adicionalmente, se obtuvo un mejor costo-efectividad en la vivienda Tope VIS debido a la proporción de vivienda de este tipo que no ha sido construida y en las que los costos de implementar elementos eficientes serían menores.

[8] El presupuesto asignado para la construcción y el mantenimiento de los SUDS en cada escenario se modificó teniendo en cuenta el valor designado por el municipio de Soacha para invertir en infraestructura pública.

Tabla 78. Mitigación por el uso de equipos eficientes

	Ducha, sanitario, lavaplatos con aireador y lavamanos con aireador desde el 2023 Uso en viviendas nuevas a partir del 2021			Todas las viviendas desde el 2023 Uso en viviendas nuevas a partir del 2021				Implementa-ción paulatina 2021-2024
	VIP	**VIS**	**Tope VIS**	**Ducha**	**Sanitario**	**Lavaplatos**	**Lavamanos**	**Lavadora**
Costo-eficiencia y costo-efectividad (USD/tCO2-eq):	$ 630.8	$ 397.1	$ 255.3	-$ 63.9	$ 2,172.8	-$ 568.8	$ 548.5	$ 2,695.8
Mitigación (tCO2-eq)	2,564.0	3,142.9	2,042.0	3,068.0	2,072.8	2,104.3	503.8	4,767.6

En la Figura 58 se comparan las emisiones de la línea base con las emisiones si se implementan los equipos eficientes en todas las viviendas. El cambio de la ducha puede llevar a una reducción anual promedio de 8.52% durante el periodo 2023-2030. El potencial de mitigación del aireador para lavaplatos durante este periodo es de 5.84%. Dado que su valor corresponde al 24.1% del costo de compra e instalación de una ducha, el uso de éste puede ser más factible como estrategia de mitigación. Por otra parte, el lavamanos presenta el menor potencial de mitigación de emisiones de $CO_{2\text{-eq,}}$ correspondiente a un promedio anual de 1.40% durante el periodo 2023-2030. A su vez, durante este periodo, la lavadora tiene un potencial de mitigación en las emisiones por manejo del agua de 5.71% y, a su vez, permite reducir el uso de energía en la vivienda. Sin embargo, es importante considerar que los hábitos de lavado de ropa, como la carga de ropa por ciclo, son determinantes en el ahorro real del equipo [103]. Por esto, la mitigación real puede ser menor si en la vivienda no se usa la lavadora con cargas altas. Si se reemplazan todos los equipos el ahorro promedio anual durante el tiempo de operación corresponde a 27.3%. Por lo que el incremento entre 2018-2030 por manejo de agua sería de 54.0%, en comparación con la línea base en la cual el incremento previsto en este sector es del 112.2%.

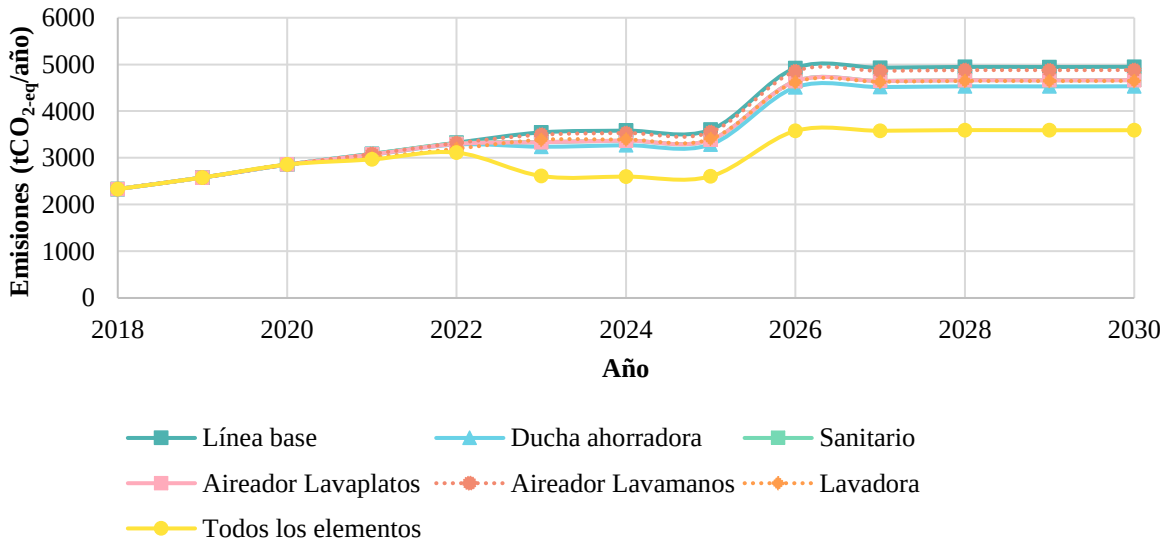


Figura 58. Comparación de emisiones anuales bajo la implementación de equipos eficientes

Por otro lado, teniendo en cuenta que la implementación de los elementos eficientes depende de los equipos instalados en la actualidad en las viviendas y sus patrones de consumo, la Figura 59 evidencia que el reemplazo de equipos en vivienda VIS tiene un mayor potencial de mitigación anual. Esta estrategia sumada al reemplazo de lavadoras en todas las viviendas puede llevar a que el incremento de las emisiones entre el 2018 y el 2030 sea del 81%.

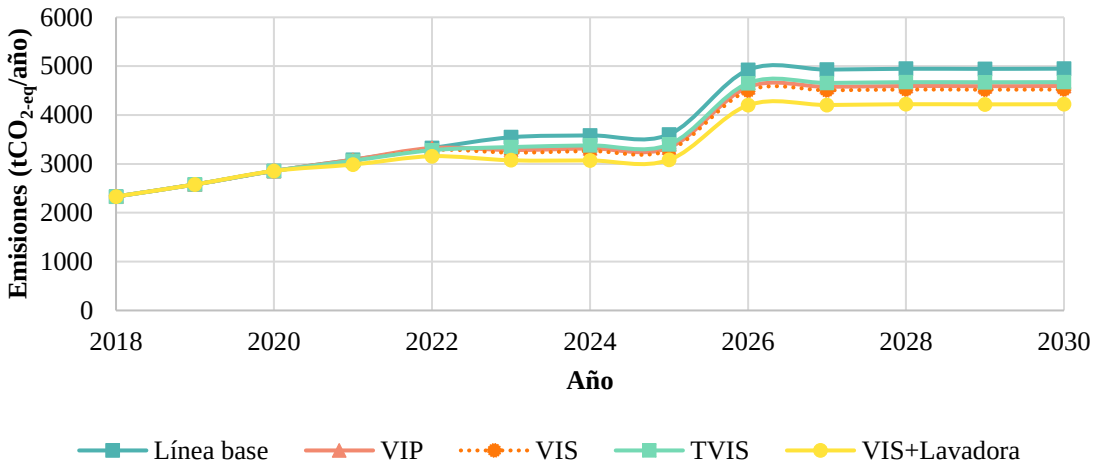


Figura 59. Comparación de emisiones anuales bajo la implementación de equipos eficientes en los distintos tipos de vivienda.

- ***Sistema de reúso de aguas grises***

Se analizan dos alternativas para el reúso de aguas grises, asociadas a un sistema con capacidad de 500 L/día compuesto por dos tanques de 840 mm de diámetro. La selección de este sistema estuvo condicionada por la disponibilidad comercial, pues una capacidad de 500 L/día corresponde a la mínima comúnmente manejada para sistemas de tratamiento de aguas grises. Su desempeño es evaluado si se instala uno por vivienda o uno compartido por dos viviendas. Esta última alternativa es considerada por la capacidad del sistema seleccionado, ya que es mayor a la requerida por vivienda y el riesgo por la presencia de patógenos es menor cuando el reúso de agua se hace en escalas pequeñas como se ha evidenciado en otros estudios [104]. La longitud requerida para los usos dentro de las viviendas se aproximó a partir de la longitud de las redes del conjunto Calicanto, ya que se contaba con información de diseño de detalle. Este conjunto de la constructora Amarilo es tope VIS de modo que pueden presentarse variaciones en otro tipo de viviendas, sin embargo, constituye una aproximación necesaria debido a la importancia de caracterizar el costo de las tuberías.

Por otro lado, los resultados de la encuesta indicaron que el porcentaje de agua gris reutilizada y el aprovechamiento de agua lluvia equivale a aproximadamente 20.97% del agua consumida en Ciudad Verde. Para todos los usos reportados el agua gris corresponde a la fuente principal para las personas encuestadas (ver la Figura 60). Estas características fueron determinantes en el análisis del potencial del reúso de aguas grises en el área puesto que las alternativas propuestas deben suplir el uso preexistente de otras fuentes. Por este motivo, se incluye un consumo per cápita adicional, lo cual afecta la valoración de su capacidad de mitigación. En todo caso, es importante resaltar que la disposición de este sistema permitiría el reúso de aguas grises las viviendas en las que no se hace por posibles riesgos asociados a la calidad del agua o por razones técnicas. En la encuesta, 19% de las personas que no reúsan agua indicaron que no lo hacen por preocupaciones sobre la higiene y posibles riesgos de salud. A su vez, el 17% indicó que no lo hacía porque no sabía cómo hacerlo. Adicionalmente, un sistema de este tipo permitiría incrementar el porcentaje de agua gris empleada en las viviendas en las que ya existe reúso.

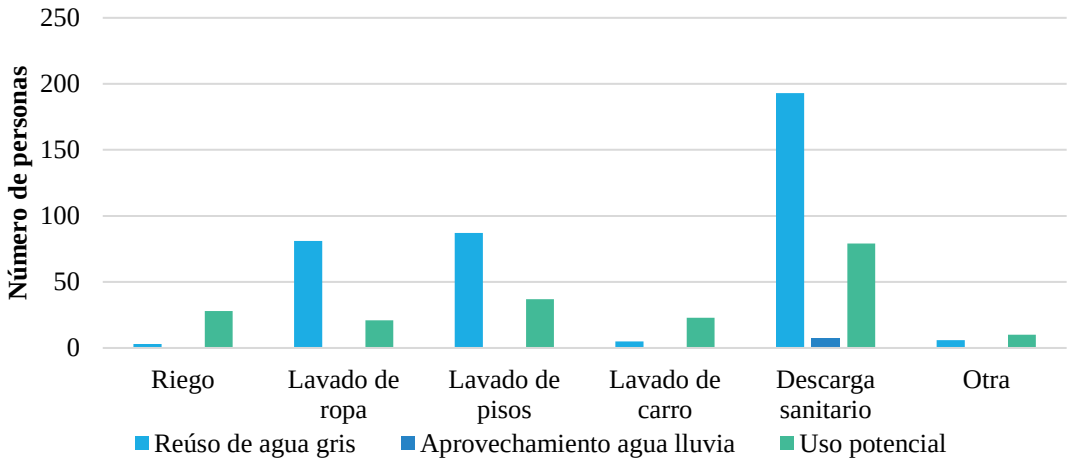


Figura 60. Uso de fuentes de agua no potables en Ciudad Verde

Las fuentes y uso potenciales considerados incluyen ducha, lavamanos y lavadora como fuente, y sanitario, lavadero y lavadora como uso. En la Tabla 79 se resume la disminución en el consumo de agua potable y en la descarga de aguas residuales por el uso de aguas grises como fuente alternativa. Se observa que la diferencia entre el ahorro de agua y la reducción del agua residual descargada entre un sistema con una capacidad de 250 litros y uno con 500 litros no es significativa, pues las fuentes alternativas de agua consideradas son limitadas. Adicionalmente, para los usos propuestos y las fuentes consideradas, el uso promedio de agua gris mediante la implementación de este sistema es similar al ahorro actual (i.e., 20.97%) que se genera mediante prácticas caseras (p.ej. colocar un balde en la ducha o retirar la manguera de la lavadora para disponer del agua). Aun así, el uso de un sistema de reciclaje como el propuesto incluye el almacenamiento y tratamiento del agua gris, por lo que los riesgos de salud pública disminuirían y el suministro sería continuo. De esta manera, los habitantes podrían tener acceso a un volumen de agua adecuado para cubrir sus necesidades básicas. Es importante aclarar que el cálculo del reúso de agua gris actual puede estar sobreestimado para Ciudad Verde ya que se asumió que cuando se indicaba el empleo de agua gris para cierto uso, la totalidad del agua requerida para el mismo era suplida por esta fuente. Por lo que los valores de ahorro mediante la implementación de este sistema pueden ser mayores.

Tabla 79. Reducción en el consumo de agua potable por el uso de sistemas de reúso de agua gris

Parámetro		**Capacidad por vivienda**	
		250 litros	**500 litros**
Consumo de agua gris (sistema)	m^3	11’512,067	11’587,877
Porcentaje de consumo total	%	23.3%	23.5%
Disminución en el consumo de agua potable	m^3	2’773,006	2’848,894
Reducción del agua residual descargada	m^3	4’095,134	4’159,771
Porcentaje reducción	%	9.8%	9.9%

En la Tabla 80 se presenta la mitigación potencial si se emplean estos sistemas para la totalidad de usos y fuentes, puesto que en los otros esquemas el ahorro de agua no es suficiente para reemplazar el uso actual de fuentes no potables. Si bien, una mayor capacidad por vivienda incrementa la mitigación de $CO_{2\text{-eq}}$ este incremento es muy bajo en relación con el incremento de los costos, por lo que un sistema compartido por dos viviendas es preferible. A su vez, en la Figura 61 se evidencia que la diferencia entre las emisiones para los dos esquemas evaluados es muy baja. Para un esquema en la que la capacidad por vivienda sea 250 L/día la reducción promedio anual de las emisiones es de 10.2% durante el tiempo de operación. Así mismo, con este reúso el incremento de las emisiones entre el 2018 y el 2030 es de 89.8%.

Tabla 80. Mitigación por el uso de sistemas de reúso de agua gris

Parámetro	Capacidad por vivienda	
	250 litros	500 litros
Costo-eficiencia (USD/$tCO_{2\text{-eq}}$):	$ 25,074.9	$ 49,352.4
Mitigación ($tCO_{2\text{-eq}}$)	3,648.0	3,737.8

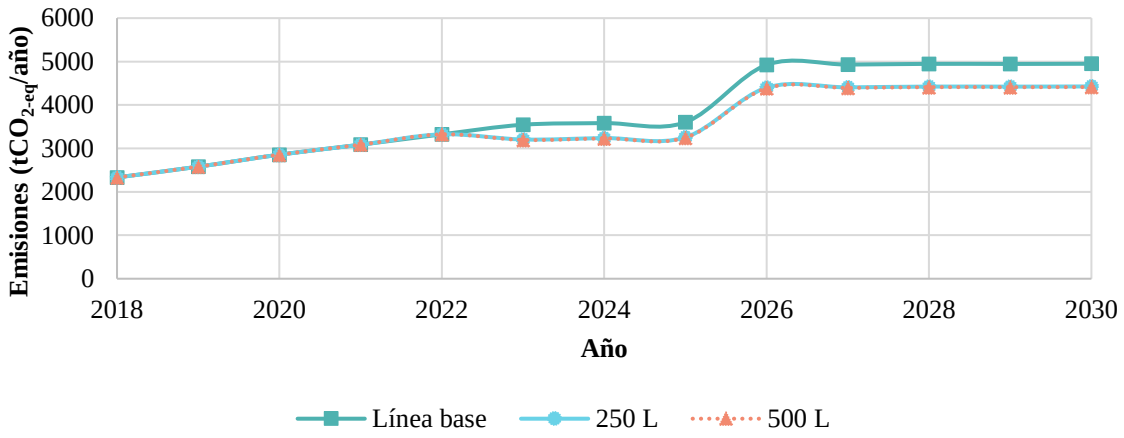


Figura 61. Comparación de emisiones anuales bajo la implementación de alternativas de reúso de aguas grises

- ***Sistema de aprovechamiento de aguas lluvias***

El aprovechamiento de aguas lluvias se evaluó para las manzanas con vivienda para uso en sanitario, lavadero y lavadora. Se tuvo en cuenta el consumo preexistente en Ciudad Verde de acuerdo con las encuestas, el cual en promedio corresponde a 0.41%. Para los distintos usos se analizaron varios tamaños de tanque y distribuciones por conjunto residencial. En la Figura 62 se presenta la comparación del ahorro potencial de agua potable para distintos tamaños y cantidad de tanques por conjunto residencial. Como se resume en esta figura, el incremento del tamaño del tanque no lleva a un incremento proporcional en el ahorro de agua potable. A partir de esto y de los sistemas comerciales disponibles se plantearon tres esquemas de aprovechamiento de agua lluvia: (a) un sistema 1.5 m^3/día por cada torre, (b) un sistema de 5 m^3/día por cada tres torres y (c) dos sistemas de 5 m^3/día por conjunto. La longitud requerida para los usos dentro de las viviendas se estimó a partir de la longitud de las redes de torres de apartamentos del edificio Calicanto.

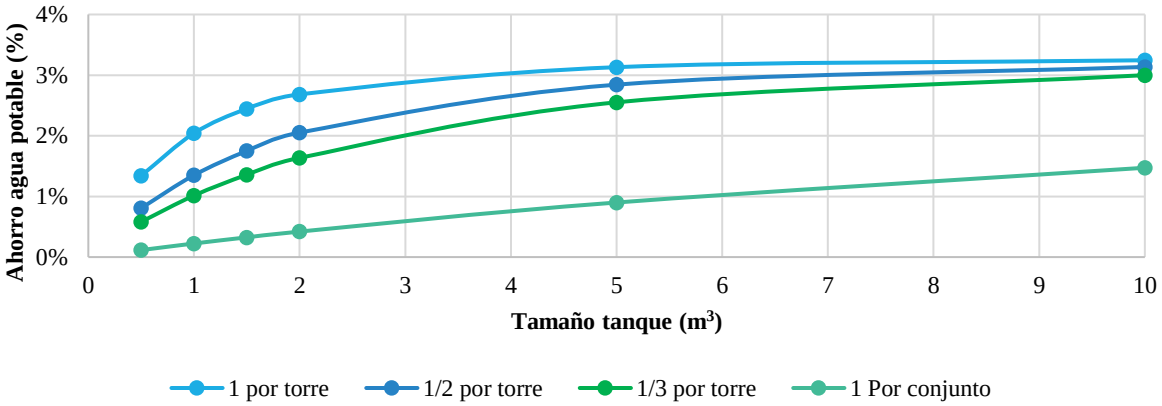


Figura 62. Ahorro de agua potable durante el tiempo de operación considerando esquemas de aprovechamiento de agua lluvia

En la Tabla 81 se resume la disminución en el consumo de agua potable y en la descarga de escorrentía por el uso del agua lluvia como fuente alternativa. De los resultados obtenidos se observa una reducción

muy baja en el consumo de agua potable y en la descarga de escorrentía. Esto se debe a que los valores de precipitación de Ciudad Verde son bajos (i.e., 545.28 mm/año) y no se puede asegurar el suministro continuo de agua. Adicionalmente, debido a que se presentan periodos secos antecedentes extensos, para suplir la demanda de usos no potables se debe almacenar una cantidad de agua que no se puede suplir mediante esta fuente. El agua lluvia disponible para su aprovechamiento podría aumentar si se considera el almacenamiento del agua proveniente de otras superficies diferentes a los techos.

Tabla 81. Disminución del consumo de agua potable y la escorrentía por el uso de sistemas de aprovechamiento de agua lluvia

		Sistema 1.5 m^3 Un sistema por torre				**Sistema 5 m^3 Un sistema cada tres torres**				**Sistema 5 m^3 Dos sistemas por conjunto**			
		S	**L**	**Lv**	**T**	**S**	**L**	**Lv**	**T**	**S**	**L**	**Lv**	**T**
Disminución en el consumo de agua potable	m^3	654,844	666,908	584,896	668,629	686,512	700,033	613,646	704,027	345,241	345,241	329,600	345,241
	%	1.3%	1.4%	1.2%	1.4%	1.4%	1.4%	1.2%	1.4%	0.7%	0.7%	0.7%	0.7%
Disminución de la escorrentía (m^3)	m^3	799,534	811,576	729,591	813,327	831,189	844,700	758,336	848,698	489,914	489,914	474,304	489,914
	%	13.5%	13.7%	12.3%	13.8%	14.1%	14.3%	12.8%	14.3%	8.3%	8.3%	8.0%	8.3%

S: Sanitario, L: Lavadora, Lv: Lavadero, T: Sanitario, lavadora y lavadero

Adicionalmente, como resultado se obtuvo que la variación en la mitigación potencial de $CO_{2\text{-eq}}$ para los diferentes usos es muy pequeña. En la Tabla 82 se presentan la mitigación asociada a sistemas con distinta capacidad y usos para el agua lluvia. La cantidad de agua potable ahorrada no varía para los distintos usos evaluados pero la longitud de la tubería necesaria para los distintos usos en la vivienda afecta el costo final. A su vez, la mitigación potencial es muy baja en comparación con los escenarios de la línea base (Figura 63). El promedio de mitigación anual durante la operación es 1.84% si se usa un tanque de 1.5 m^3 por cada torre de apartamentos, de 1.94% si se usa un tanque de 5 m^3 por cada tres torres y 0.95% si se usa un sistema con capacidad de 10 m^3 por conjunto residencial. En este caso la alternativa con mayor costo-eficiencia corresponde al uso de un sistema con capacidad de 10 m^3 para reúso en lavadora. Sin embargo, el sistema con un tanque de 5 m^3 tiene potencial de mitigación 50.6% mayor con un incremento en el costo por tonelada abatida del 22.6%.

Tabla 82. Mitigación por el uso de sistemas de aprovechamiento de agua lluvia

	Sistema 1.5 m^3 Un sistema por torre				**Sistema 5 m^3 Un sistema cada tres torres**				**Sistema 5 m^3 Dos sistemas por conjunto**			
	S	**L**	**Lv**	**T**	**S**	**L**	**Lv**	**T**	**S**	**L**	**Lv**	**Ts**
Costo-eficiencia (USD/$tCO_{2\text{-eq}}$):	$ 10,535.3	$ 10,252.5	$ 11,813.0	$ 10,298.4	$ 3,930.1	$ 3,764.2	$ 4,419.6	$ 3,808.3	$ 3,057.4	$ 2,912.5	$ 3,080.0	$ 3,057.4
Mitigación ($tCO_{2\text{-eq}}$)	605.2	616.3	540.6	617.9	634.4	646.9	567.2	650.6	319.5	319.5	305.0	319.5

S: Sanitario, L: Lavadora, Lv: Lavadero, T: Sanitario, lavadora y lavadero

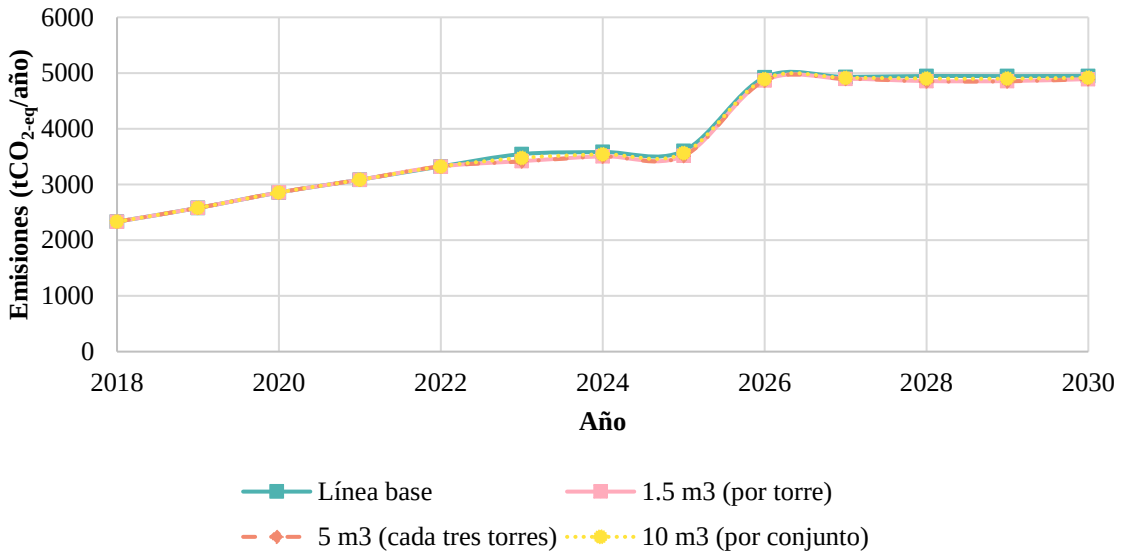


Figura 63. Comparación de emisiones anuales bajo la implementación de dos alternativas de aprovechamiento de agua lluvia

- ***Análisis conjunto de estrategias para el manejo de la demanda***

Para las medidas cuyo efecto no es directamente aditivo se analizan dos paquetes: (P1) elementos eficientes y sistema de reúso de aguas grises y (P2) sistema de aprovechamiento de agua lluvia y elementos eficientes. La combinación más costo-efectiva corresponde al aprovechamiento de agua lluvia en conjunto con elementos eficientes (Ver Tabla 83). En todo caso, los posibles beneficios económicos asociados a la reducción de uso de agua potable son menores que los costos de implementación de las medidas en ambos paquetes. Sin embargo, la Figura 64 evidencia que el primer paquete tiene un mayor potencial de mitigación, puesto que la mitigación anual de $CO_{2\text{-eq}}$ promedio durante el tiempo de operación del primer paquete es de 28.6% y para el segundo paquete es de 22.1%.

Tabla 83. Paquetes propuestos para el manejo de la demanda

Paquete	**P1**	**P2**
Elementos eficientes	Ducha, sanitario, lavamanos, lavaplatos	Ducha, sanitario, lavamanos, lavaplatos
Fuente alternativa de agua	Agua gris. Sistema 250 l/día por vivienda Ducha, lavamanos y lavadora	Agua lluvia: Sistema 5 m^3 cada tres torres
Uso de agua	Sanitario, lavadero y lavadora	Sanitario, lavadero y lavadora
Ahorro de agua potable (m^3)	8475604 (17%)	6905789 (14%)
Uso de fuentes de agua alternativas (m^3)	9309265 (19%)	848698 (2%)
Uso adicional de fuentes de agua alternativas (m^3)	0 (0%)	631467 (1%)
Costo-efectividad (USD/$tCO_{2\text{-eq}}$):	$ 9,317.4	$ 796.3
Mitigación ($tCO_{2\text{-eq}}$)	10270.4	7899.9

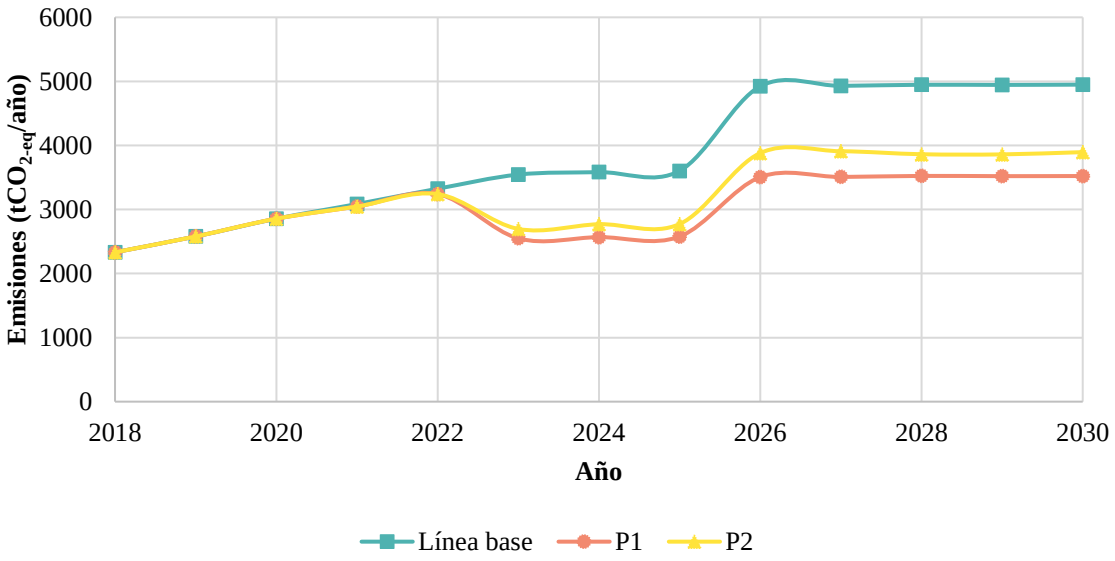


Figura 64. Comparación de emisiones anuales bajo la implementación de los paquetes propuestos

- ***Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)***

En primer lugar, las zonas de Ciudad Verde se analizaron para priorizar y establecer áreas para la implementación de SUDS de acuerdo con beneficios relacionados con los servicios ecosistémicos, así como los requerimientos de costos y mantenimiento de las tipologías consideradas. Específicamente, se definieron las áreas que presentan mayor déficit de servicios ecosistémicos y dichas áreas se priorizaron para la implementación de SUDS. La metodología para realizar dicha priorización se detalla en el Anexo 10. La Figura 65 presenta los índices de priorización para los servicios de provisión, regulación y socioculturales. Se realizó una clasificación de los índices de acuerdo con los percentiles 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1. Los polígonos clasificados en el percentil 0.2 presentan el menor potencial para proveer servicios mientras que los del percentil 0.8, el mayor potencial.

La información relacionada con la sobrecarga de las tuberías se obtuvo mediante una modelación hidráulica de la red de drenaje de Ciudad Verde en el programa *Storm Water Management Model* (SWMM). Para dicha modelación, se utilizó una lluvia de diseño con un periodo de retorno de 5 años y una duración de 6 horas [18]. Esta se calculó mediante la curva IDF de la estación Bosa-Barreno. Adicionalmente, la estimación de la infiltración se llevó a cabo mediante el modelo de Horton y el tránsito hidráulico considerando el modelo de onda dinámica. Por otro lado, la información de amenaza por inundación se consultó en la base de datos SIG de Soacha. Respecto a los ingresos socioeconómicos de los habitantes, la densidad de población y la presencia de población vulnerable, esta se recolectó mediante la encuesta aplicada a los habitantes de Ciudad Verde.

De la Figura 65 se observa que la zona que presenta mayor déficit del servicio de provisión se encuentra en el noroccidente de la Ciudad Verde. En dicha área las zonas verdes representan el 50% del área total. En cuanto a los servicios de regulación, las áreas prioritarias corresponden a las zonas ubicadas al suroriente de la ciudadela, las cuales poseen la mayor cantidad de área impermeable y se encuentran más cerca a la planicie de inundación del Río Soacha. Respecto a los servicios socioculturales, la zona priorizada se ubica en el nororiente de la Ciudad Verde. En esta, el ingreso promedio de los habitantes es 52% más bajo que el promedio de la población de Ciudad Verde.

La Figura 66 presenta los resultados obtenidos para el índice de priorización que resulta del análisis de los diferentes servicios ecosistémicos. Así pues, se obtuvo un mayor valor del índice en las zonas señaladas como 1, 2, 4 y 5, lo que indica que estas tienen mayor necesidad de intervención. En la actualidad, la zona 4 no ha sido desarrollada en su totalidad, lo que representa una oportunidad para evaluar la distribución de los usos del suelo tanto en áreas públicas como en áreas privadas y garantizar una mayor proporción de área verde.

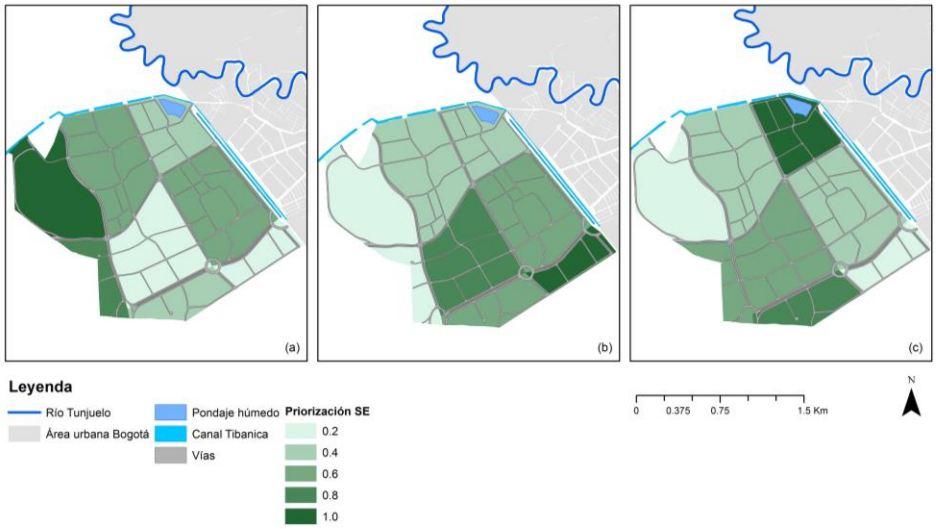


Figura 65. Áreas priorizadas de acuerdo con los servicios ecosistémicos de: (a) provisión, (b) regulación y (c) socio-culturales

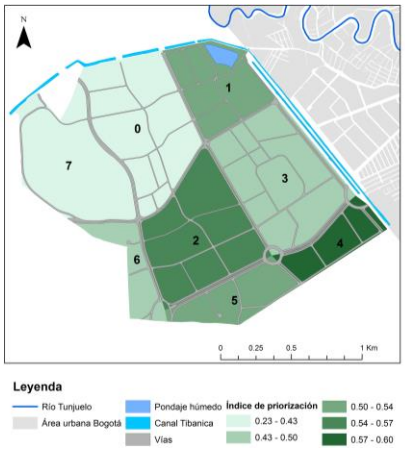


Figura 66. Áreas prioritarias para la intervención mediante SUDS

En segundo lugar, se analizaron las características del espacio público con el fin de establecer y seleccionar las áreas que pueden proveer mayor cantidad de servicios ecosistémicos. La Figura 67 presenta el potencial de cada polígono de espacio público para brindar servicios de provisión, regulación y socioculturales mientras que la Figura 68 exhibe los resultados obtenidos para el conjunto de servicios. Se realizó una clasificación del potencial de acuerdo con los percentiles 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1. La tasa de infiltración se calculó mediante los valores de infiltración aproximados en la investigación del Centro de Investigación de Ingeniería Ambiental (CIIA) de la Universidad de los Andes, que se obtuvieron por medio de datos geológicos y geotécnicos de Bogotá [105]. La información del tráfico peatonal, por su parte, se aproximó a partir de los resultados obtenidos en la encuesta realizada a los habitantes de Ciudad Verde.

De la Figura 67 y la Figura 68 se observa que el espacio público ubicado en la zona nororiental de la ciudadela posee un gran potencial para proveer servicios ecosistémicos en comparación con la zona

oriental y sur. Dichas áreas corresponden principalmente a parques de escala zonal. Por otro lado, al comparar el potencial de las áreas públicas para proveer servicios ecosistémicos con las zonas prioritarias, se percibe que las áreas con mayor potencial para generar beneficios son las que tienen menor necesidad de intervención.

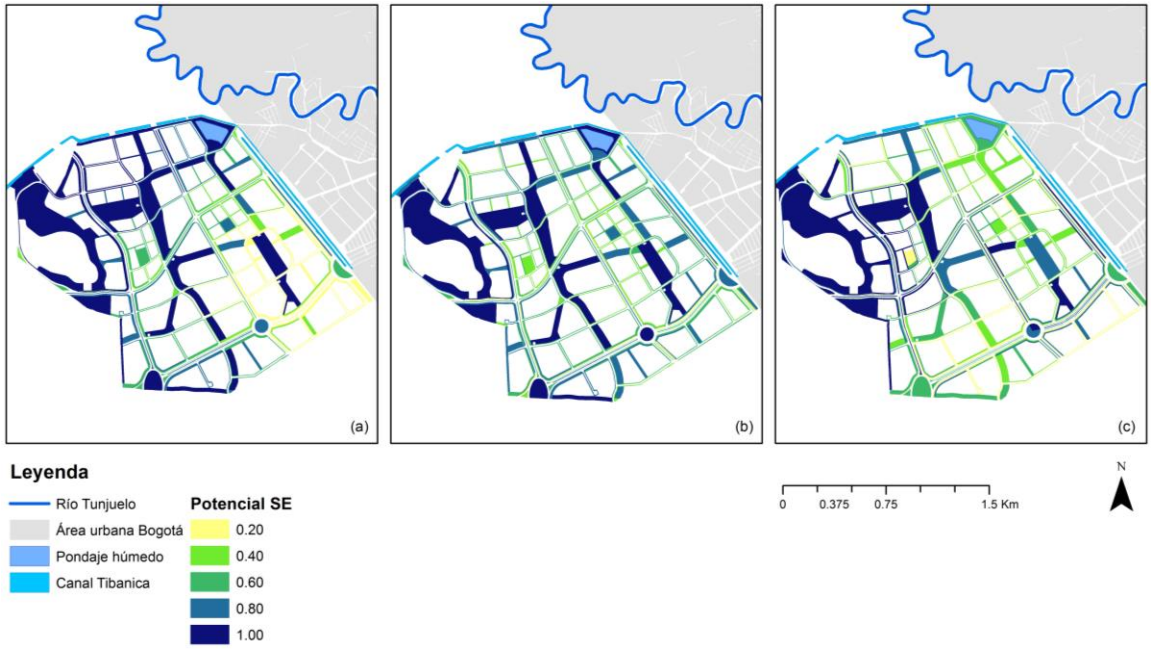


Figura 67. Potencial de las zonas públicas para proveer servicios de: (a) provisión, (b) regulación y (c) socio-culturales

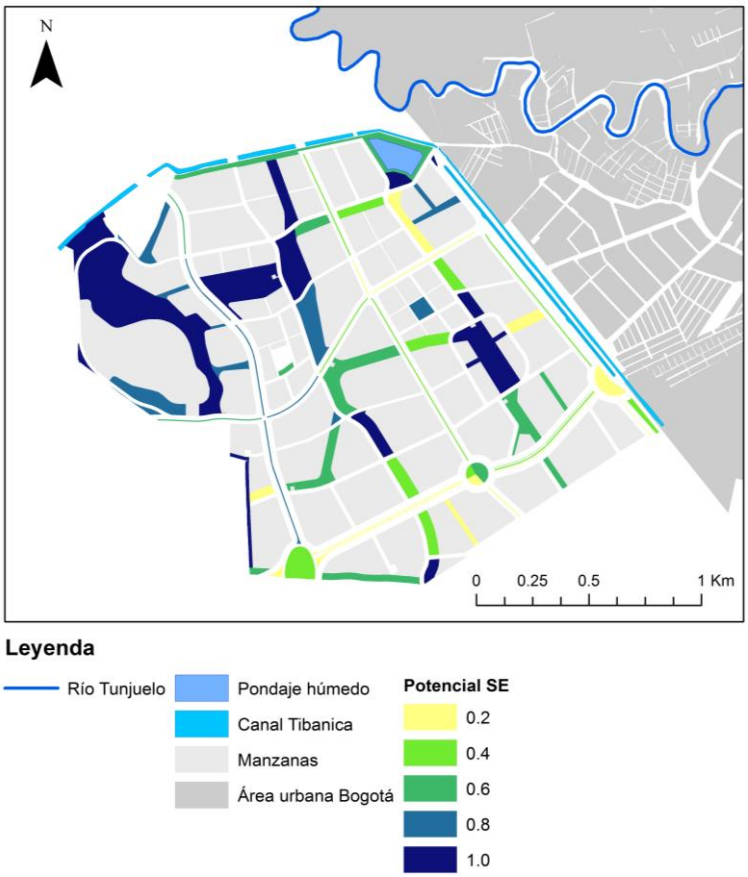


Figura 68. Potencial de las zonas públicas para proveer servicios ecosistémicos

Finalmente, la selección y ubicación de las tipologías específicas a implementar en el espacio público se realizó mediante el modelo de optimización desarrollado por Torres et al. [18], cuya descripción se presenta en el Anexo 10. Para tal fin se consideraron cuatro escenarios, en los cuales el presupuesto asignado para la construcción y el mantenimiento de los SUDS se modificó teniendo en cuenta el valor designado por el municipio de Soacha para invertir en infraestructura pública [106]. Dichos valores se presentan en la Tabla 84.

Tabla 84. Presupuestos considerados para la construcción y mantenimiento de SUDS

Escenario	Características	Valor
A	Sin limitación de presupuesto	-
B	5% del presupuesto anual asignado para infraestructura	$ 1,290,797,287.55
C	10% del presupuesto anual asignado para infraestructura	$ 2,581,594,575.10
D	20% del presupuesto anual asignado para infraestructura	$ 5,163,189,150.20

La información de evaporación utilizada en el modelo se aproximó mediante los valores de evaporación potencial reportados en la estación de la EAB “Las Huertas”. Se asumió un factor de tanque de 0.8 y se emplearon factores específicos de la vegetación asociada a cada tipología [107]. Los valores empleados se presentan en la Tabla 85. A su vez, se utilizó un evento de precipitación con un periodo de retorno de 5 años y una duración de 6 horas [18], el cual se estimó mediante la curva IDF de la estación Bosa-Barreno.

Tabla 85. Información de evaporación por tipología de SUDS

Tipología	Evaporación (mm/hr)
Cunetas verdes	0.056
Zonas de bioretención	0.051

Tipología	Evaporación (mm/hr)
Alcorques inundables	0.072
Cuenca seca de drenaje extendido (CSDE)	0.056
Zanjas de infiltración	0.000
Pavimentos permeables	0.000
Pondajes húmedos	0.108
Humedales construidos	0.123
Cuencas de infiltración	0.056

La Tabla 86 presenta las tipologías de SUDS seleccionadas en cada escenario y, la Figura 67, la ubicación óptima de cada una en Ciudad Verde. De los resultados obtenidos se puede observar que, para el escenario que posee un presupuesto ilimitado para la construcción de SUDS, la tipología más adecuada para gran parte de las áreas es la zona de bioretención. Esta tiene la capacidad de proveer mayor cantidad de servicios ecosistémicos en comparación con otras estructuras de SUDS por el tipo de vegetación que posee. Por otro lado, al analizar el escenario B, se observa que la mayoría de las tipologías seleccionadas corresponden a cunetas verdes. Estas se caracterizan por ser estructuras de bajo costo, así como por tener requerimientos de mantenimiento mucho más bajos que tipologías que poseen vegetación o algún medio filtrante. Adicionalmente, en dicho escenario se seleccionan tipologías de retención e infiltración como las cuencas de infiltración, los pondajes húmedos y la CSDE, las cuales permiten atenuar la mayor cantidad escorrentía posible en el área.

Tabla 86. Número de tipologías seleccionadas por escenario

Escenario	Tipologías seleccionadas								
	Cunetas verdes	Zonas de bioretención	Alcorques inundables	Cuenca seca de drenaje extendido	Zanjas de infiltración	Pavimentos permeables	Pondajes húmedos	Humedales construidos	Cuencas de infiltración
A	0	25	1	3	0	0	2	0	6
B	7	0	0	3	0	0	3	0	1
C	9	0	0	1	0	0	14	0	0
D	9	8	1	0	0	0	14	1	4

Respecto al escenario C, se observa que el pondaje húmedo es la tipología más adecuada para gran cantidad de polígonos del espacio público. Debido a los altos costos de construcción y mantenimiento de las zonas de bioretención respecto a su capacidad para reducir la escorrentía, estas tipologías no salen aptas para el presupuesto asignado en este escenario. Los pondajes húmedos, que tienen capacidad de atenuar grandes volúmenes de escorrentía y proveer diversos servicios ecosistémicos por la lámina de agua permanente que poseen, se seleccionan como las tipologías más idóneas. Así mismo, se eligen otras tipologías de detención como las cunetas verdes. Por último, en los resultados obtenidos para el escenario D se observa que las tipologías más adecuadas para las necesidades del área son las zonas de bioretención, los pondajes húmedos y las cunetas verdes.

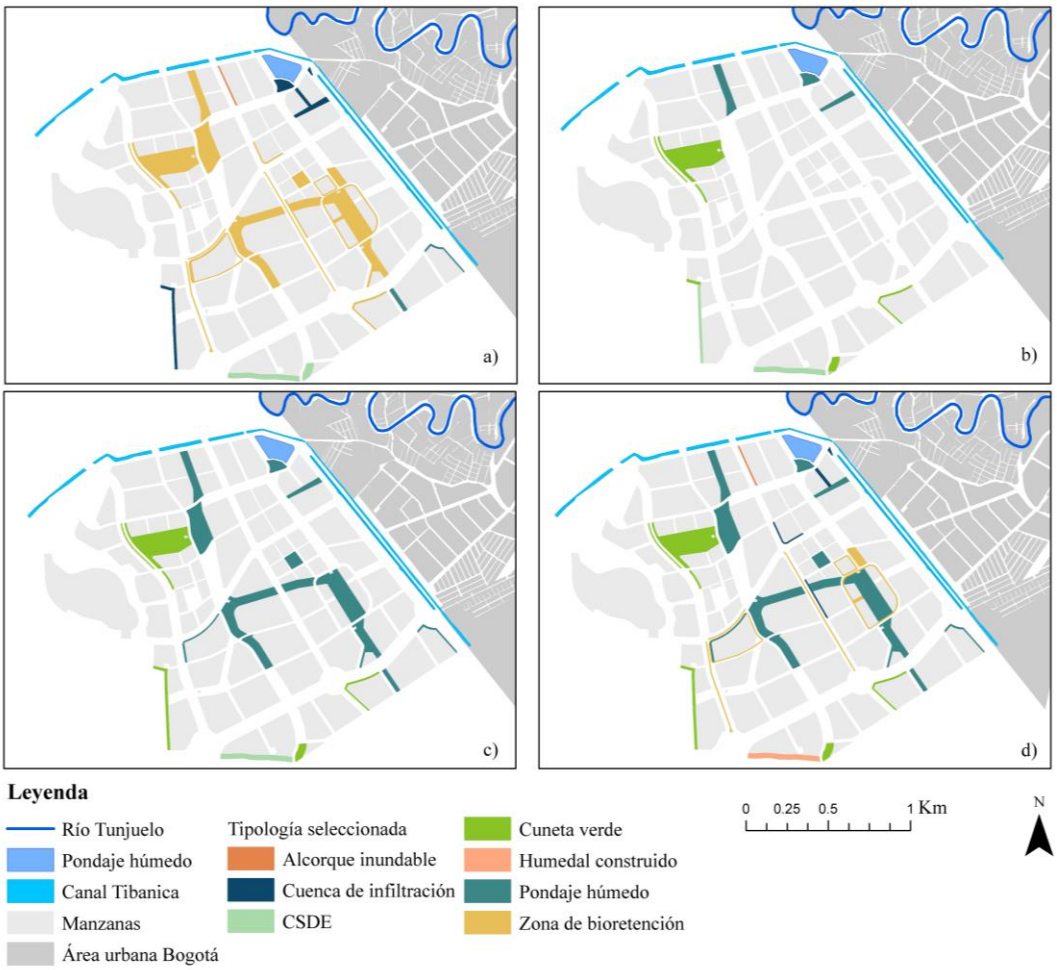


Figura 69. Tipologías seleccionadas para: a) Escenario A, b) Escenario B, c) Escenario C y d) Escenario D

La Tabla 87 presenta el desempeño de las tipologías en la reducción de los volúmenes de escorrentía y la costo-efectividad de implementar el conjunto de estructuras para cada escenario si, en su estimación, se consideran los beneficios por la mitigación de GEI. A pesar de que la diferencia entre el presupuesto requerido para la implementación de SUDS entre los escenarios A y D es del 56%, la diferencia entre la atenuación de escorrentía es tan solo del 0.996%. Así pues, existe un punto de inflexión en la reducción de escorrentía, que se encuentra entre los presupuestos asignados para el escenario C y D. Luego este punto, la reducción de la escorrentía no es significativa; sin embargo, se aumenta la provisión de otros servicios ecosistémicos como la captura de carbono.

Tabla 87. Desempeño de las tipologías en cada escenario

Escenario	Escorrentía descargada (m^3)	Escorrentía atenuada (%)	Costo-efectividad (COP/$tCO_{2\text{-eq}}$)
A	15.67	99.90%	$52,293,632.92
B	13297.26	15.91%	$41,910,994.11
C	5031.73	70.91%	$39,059,479.40
D	173.09	98.91%	$44,118,842.39

La Figura 70 presenta la reducción de las emisiones de $CO_{2\text{-eq}}$ asociadas al manejo de escorrentía en cada uno de los escenarios. Dicha reducción es del 5%, 11%, 19% y 76% al comparar el escenario *Bussines As Usual (BAU)* con los escenarios B, C, D y A, respectivamente. Adicionalmente, se observa que la reducción de las emisiones respecto al total por el manejo integrado del agua no es significativa (i.e. 1.3%

para el escenario A). Esto considerando que las emisiones asociadas al manejo de la escorrentía en Ciudad Verde representan tan solo el 1.5% de las emisiones totales por la gestión del agua.

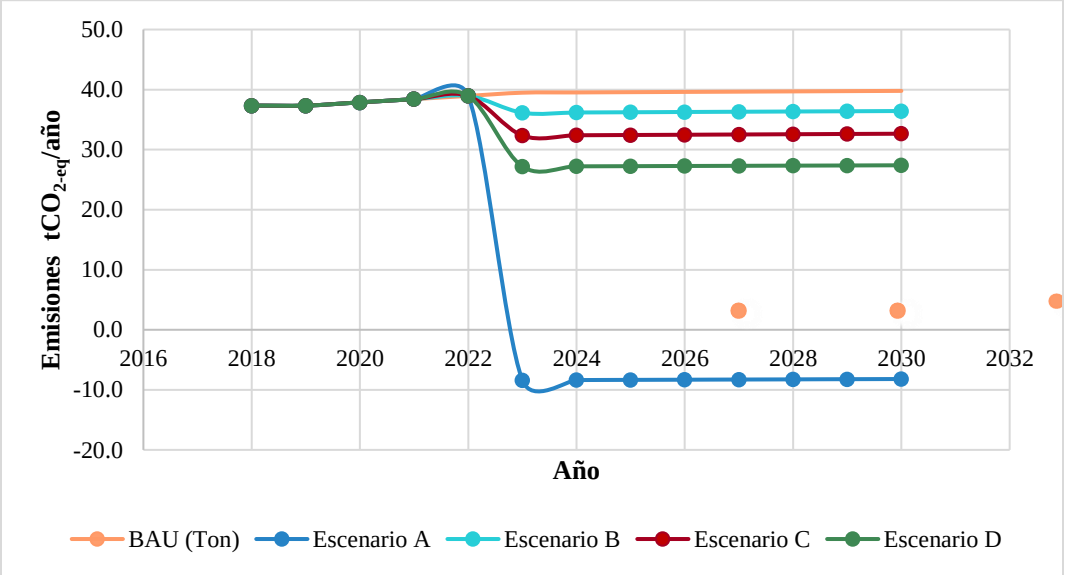


Figura 70. Comparación de emisiones por manejo de escorrentía anuales bajo la implementación de SUDS

Por otro lado, se observa que el escenario que presenta mayor costo-efectividad es el C. Para este se realizó una valoración económica de algunos servicios ecosistémicos provistos los SUDS seleccionados (Ver Figura 71). Se seleccionaron los servicios de provisión y regulación del agua (i.e., asociados a la calidad de la escorrentía). Sus resultados se utilizaron como insumo para complementar el análisis de costo-efectividad del escenario C. De esta manera, la costo-efectividad de dicho escenario se estimó nuevamente en $11,742,117. Si se compara el valor obtenido con el impuesto al carbono en Colombia (i.e., 15 mil pesos por cada tonelada de CO_2 generada) la costo-efectividad estimada es alta. Por otro parte, teniendo en cuenta la tasa retributiva por vertimientos a los cuerpos de agua, se puede concluir que, a pesar de que el agua regulada por las tipologías de SUDS seleccionadas es de 68,671.56 m^3/año y que las cargas de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST) no vertidas al alcantarillado son respectivamente 618.04 Kg/año y 3,296.23 Kg/año, el costo evitado por vertimiento a los cuerpos de agua es muy bajo ($ 313,561). Se observa que tanto el valor del impuesto al carbono como el de la tasa retributiva por vertimientos son insuficientes para estimular la implementación de los SUDS.

Es importante aclarar que existen otros beneficios asociados a la implementación de SUDS (p.ej., la disminución de los costos de mantenimiento del alcantarillado convencional por la reducción o eliminación del ingreso de sedimentos al sistema o el valor agregado estético) que no se involucraron en los cálculos de la costo-efectividad por falta de información o por su dificultad en la cuantificación. La asignación de un valor económico a los beneficios provistos por los SUDS puede ser difícil. Aun así, se hace necesario para resaltar los efectos positivos de estas estructuras como complemento al sistema de drenaje convencional. En la actualidad se están desarrollando algunas herramientas para calcular dichos beneficios. Por ejemplo, la herramienta "SPLASH" desarrollada por *The Danish Nature Agency* permite calcular el valor de algunos efectos positivos de los SUDS, como los costos de daños reducidos por la disminución de inundaciones [108].

Adicionalmente, se cuantificó el servicio de regulación de clima local, el cual está relacionado con las islas de calor urbanas. La selección y cuantificación de los servicios mencionados se realizó considerando la disponibilidad de información para el caso de estudio. Debido a la naturaleza del servicio de regulación de clima local, considerando el contexto del caso de estudio y la información disponible, no se realizó una

valoración económica pues esta implica cuantificar el ahorro de energía por disminución de la temperatura ambiental [109], [110], [111]. A pesar de que no es posible representar los resultados de este servicio en términos económicos, su cuantificación permite evidenciar los beneficios adicionales en el control de las islas de calor urbanas obtenidos por la implementación de los SUDS.

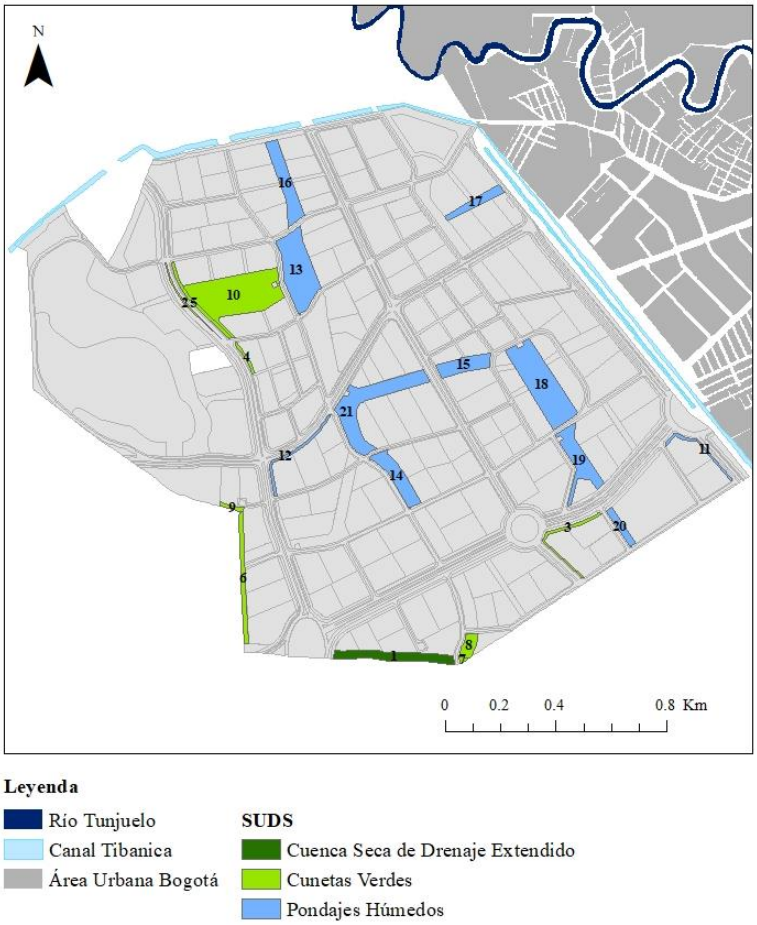


Figura 71. Ubicación de las tipologías SUDS en Ciudad Verde

La medida de cuantificación definida para valorar el servicio de provisión de agua correspondió al flujo de salida anual de los pondajes para suplir las necesidades de riego de las zonas verdes aledañas (i.e., zonas verdes dentro de un radio de 500 m). Por medio de un balance hidrológico se determinó el flujo de agua faltante para que las zonas verdes pudieran evapotranspirar a su tasa potencial (i.e., el déficit de agua). Así mismo, se realizó un balance hidrológico anual para determinar el flujo de agua para riego que podía ser suministrado por los pondajes sin afectar el volumen permanente característico de estas estructuras. Se determinaron los flujos de evapotranspiración y de salida (i.e., flujos que sobrepasan la capacidad de las estructuras una vez suplidos los requerimientos de agua para riego), los cuales fueron de utilidad en la valoración del servicio de regulación y en el análisis del desempeño de las tipologías, respectivamente. En el Anexo 10. se detalla la metodología utilizada.

Para realizar los balances hídricos se empleó información de precipitación horaria del 2013, de la estación Kennedy de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) y de evaporación para el mismo año, de la estación Huertas de la EAB-ESP. La información de evapotranspiración se estimó mediante la evaporación al utilizar un factor de tanque de 0.8 y los factores de la vegetación propios de cada tipología. Adicionalmente, para definir la capacidad de almacenamiento de los SUDS y los

volúmenes de agua lluvia de entrada se utilizó información de las áreas y profundidades de diseño de las tipologías de SUDS, las áreas de drenaje correspondientes y las características del suelo (p.ej., capacidad de campo, punto de marchitamiento permanente, niveles freáticos y tasas de infiltración).

En la Figura 72 se presentan los flujos totales obtenidos de los balances realizados para los 11 pondajes húmedos propuestos para el escenario C. Como se observa, del total de escorrentía que ingresa a las estructuras, el 69.8% es utilizado para irrigación y un 1.7% es evapotranspirado, mientras que el excedente corresponde al flujo que no puede ser manejado por los pondajes. En la Figura 73 se presentan los flujos para irrigación obtenidos para cada pondaje. Las variaciones están relacionadas con el tamaño de las estructuras, las áreas de drenaje y los requerimientos de irrigación de las zonas verdes aledañas.

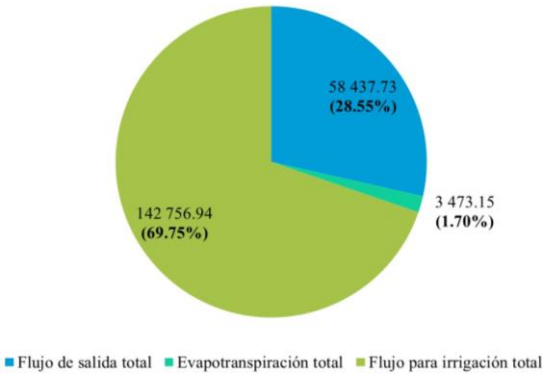


Figura 72. Flujos totales (m^3/año) para los pondajes húmedos analizados.

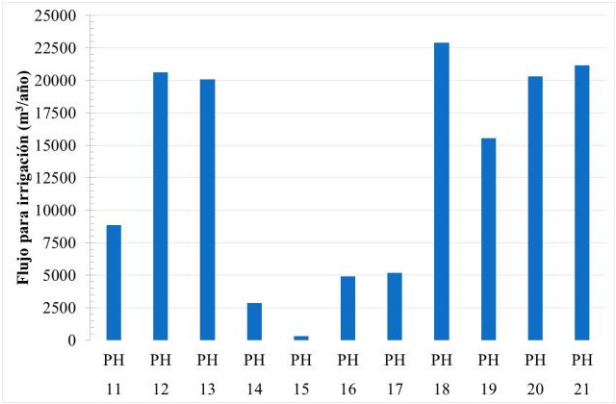


Figura 73. Flujos para irrigación anuales obtenidos de los 11 pondajes analizados (Ver Figura 71).

Por otro lado, la medida de cuantificación utilizada para valorar el servicio de regulación correspondió al flujo de agua anual regulado mediante los procesos de evapotranspiración y percolación. Cabe resaltar que a partir del agua infiltrada en el suelo se determinaron los flujos de agua que pueden ser evapotranspirados y percolados de la cuenca seca de drenaje extendido y las cunetas verdes, ya que dichos procesos ocurren en este componente. Para los pondajes húmedos sólo se tuvo en cuenta el flujo de evapotranspiración del almacenamiento superficial (tanto temporal como permanente) ya que estas tipologías están diseñadas para retener el agua lluvia y, por lo tanto, no permiten la infiltración [112]. Estos flujos también fueron determinados por medio de balances hídricos, como se detalla en el Anexo 10. La información utilizada para el análisis correspondió a la descrita anteriormente para el servicio de provisión.

En la Figura 74 y la Figura 75 se presentan los flujos regulados por la cuenca seca de drenaje extendido y las cunetas verdes, respectivamente. Se observa que, del total de agua que ingresa a las tipologías, un importante porcentaje es percolado (76.50%); aproximadamente un 30% es descargado al sistema de drenaje porque no puede ser manejado por las estructuras y el resto corresponde al agua evapotranspirada por las tipologías. En la Figura 76 se presentan los flujos de agua regulados por los SUDS definidos para el escenario C. Las variaciones están asociadas principalmente a las características de las tipologías, es decir, a la capacidad de almacenamiento en superficie y en el suelo, así como sus respectivas áreas de drenaje, las cuales definen el volumen de escorrentía que ingresa a las estructuras.

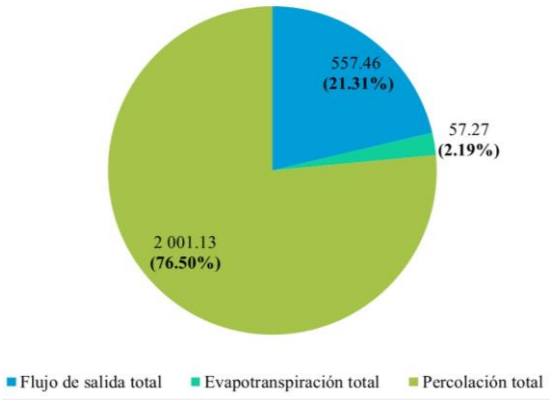


Figura 74. Flujos totales (m^3/año) obtenidos de los balances hídricos realizados para CSDE analizada.

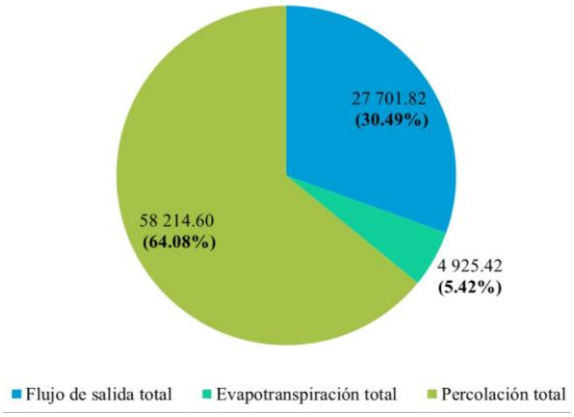


Figura 75. Flujos totales (m^3/año) obtenidos de los balances hídricos realizados para las cunetas verdes analizadas.

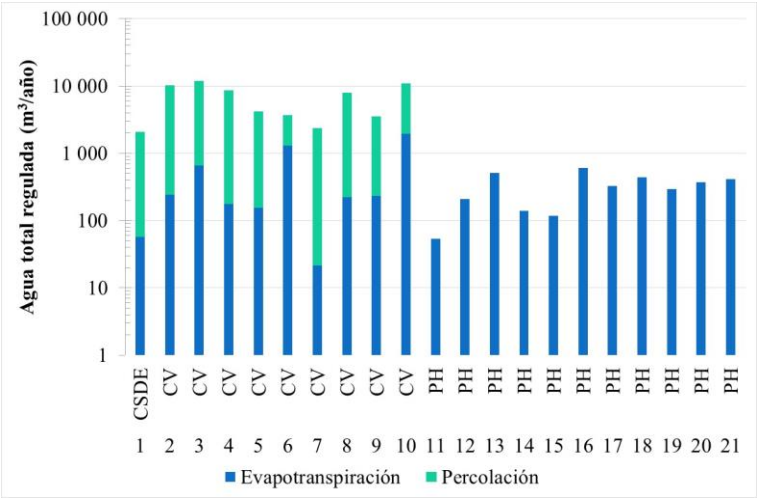


Figura 76. Flujos anuales regulados por las tipologías SUDS del escenario C (Ver Figura 71).

Por otra parte, la valoración del servicio de regulación del clima local se realizó mediante la cuantificación del cambio de la tasa de enfriamiento por el incremento de la evapotranspiración de las zonas verdes por la presencia de SUDS. Para esto, se determinó de la diferencia de la evapotranspiración en dichas zonas sin y con la implementación de SUDS, por medio de balances hídricos. Posteriormente, se estimó el cambio de la tasa de enfriamiento correspondiente mediante balances energéticos que asocian el calor sensible cedido por el ambiente con el calor necesario para evapotranspirar el agua presente en cada área. La metodología utilizada se detalla en el Anexo 10.

En la Figura 77 se presentan los resultados comparativos de la evapotranspiración promedio diaria obtenida para las zonas públicas con y sin la implementación de SUDS. Se observa que las zonas en la cuales serían implementadas la cuenca seca de drenaje extendido y las cunetas verdes evapotranspiran la misma cantidad de agua que zonas verdes, lo que significa que no se presentan diferencias significativas por la implementación de las tipologías. Esto se debe a que las características del suelo se mantienen y, por lo tanto, la capacidad para retener agua que pueda ser evapotranspirada por las plantas. Sin embargo, se observan diferencias en la evapotranspiración por la implementarían de los pondajes húmedos. Debido a que estas estructuras poseen un espejo de agua permanente, se genera un incremento de la evapotranspiración de la zona.

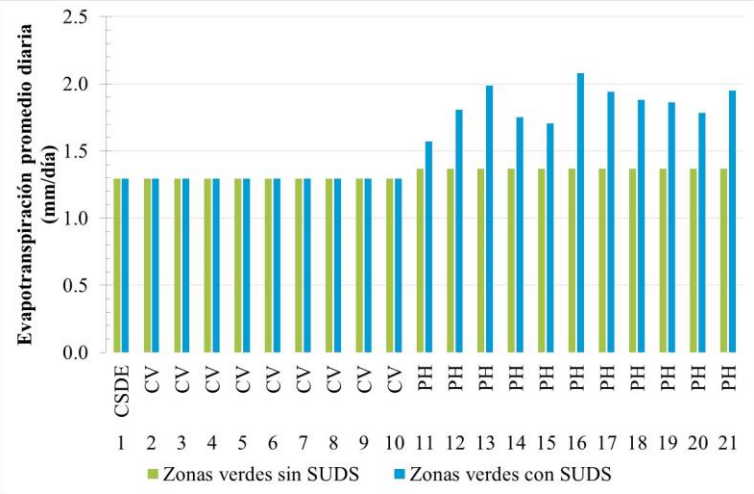


Figura 77. Evapotranspiración promedio diaria en zonas públicas con y sin la implementación de SUDS (Ver Figura 71).

A partir de la evapotranspiración y de algunas variables ambientales (p.ej., presión ambiental, humedad relativa y temperatura ambiental) se llevaron a cabo los balances energéticos para estimar el cambio en la tasa de enfriamiento a una altura de 2 metros sobre la superficie, generado por la implementación de SUDS. La presión ambiental y la humedad relativa promedio se determinaron a partir de la información disponible para la estación Kennedy de la RMCAB, para el periodo de tiempo comprendido entre el 2006 y el 2019. La temperatura ambiental se estimó a partir de ejercicios de correlación entre la información de temperatura superficial obtenida de imágenes satelitales Landsat 8 disponibles en la página *Earth Explorer* [113] y la temperatura ambiental obtenida de estaciones meteorológicas del IDEAM y de la RMCAB. Así pues, se utilizaron imágenes satelitales del 22 de marzo del 2020, 2 de enero del 2020, 30 de diciembre del 2018 y 17 de marzo del 2018 ya que, de la información disponible, dichas no presentaban nubosidad.

La información de temperatura superficial y ambiental se obtuvo en formato ráster con la misma resolución para facilitar el proceso de correlación entre celdas. Este proceso se llevó a cabo para cada fecha y para el promedio de las mismas. Mediante el promedio se obtuvieron los mejores resultados, como se observa en la Tabla 88. En la Figura 78 se presentan los resultados de la temperatura superficial y ambiental promedio obtenida de las estaciones, así como la temperatura ambiental calculada a partir del ejercicio de correlación. En la Tabla 89 se resumen los datos estadísticos más importantes de los parámetros de temperatura analizados. Se observa que el rango de variación de la temperatura superficial es de aproximadamente 8°C mientras que el de la temperatura ambiental (medida y calculada) es de 0.5 y 0.8 °C, respectivamente.

Tabla 88. Resultados de la correlación entre la temperatura superficial y ambiental

Fecha	Intercepto	Pendiente	R^2
22 de marzo de 2020	12.92	0.05	0.18
2 de enero de 2020	14.62	0.05	0.17
30 de diciembre de 2018	9.76	0.15	0.32
17 de marzo de 2018	12.48	0.07	0.18
Promedio	11.70	0.11	0.37

Tabla 89. Parámetros estadísticos relevantes para la temperatura en Ciudad Verde

Parámetro	Temperatura Ciudad Verde (°C)		
	Superficial	Medida	Calculada
Máximo	29.95	14.70	15.00
Mediana	26.39	14.43	14.61
Promedio	26.35	14.43	14.61

Mínimo	22.43	14.21	14.17
Desviación estándar	1.25	0.11	0.14

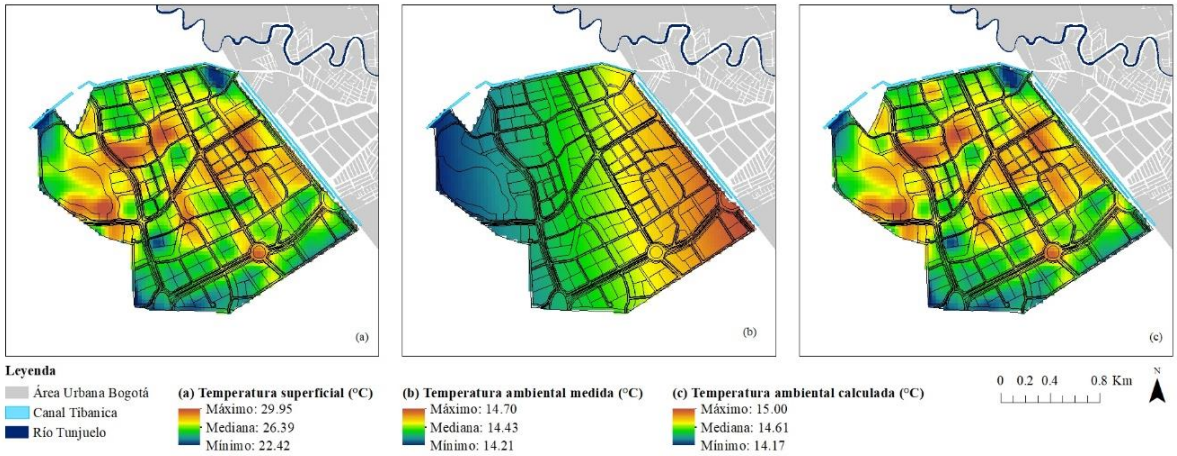


Figura 78. Mapas de temperatura promedio superficial y ambiental medida y calculada

Como se evidencia en la Figura 77, la cuenca seca de drenaje extendido y las cunetas verdes no evapotranspiran a una mayor tasa que las zonas verdes en las cuales serían implementadas, por lo tanto, no presentan un efecto adicional en la reducción de la temperatura. Sin embargo, los pondajes tienen la capacidad de reducir la temperatura de las zonas en las cuales serían implementados porque la evapotranspiración asociada es mayor. En promedio, la tasa de enfriamiento de cada zona aumentaría en 0.0075 °C/s diariamente, es decir hay un potencial adicional para disminuir la temperatura de dichas zonas. En la Figura 79 se presentan los cambios de la tasa de enfriamiento esperados por la implementación de cada pondaje. Las variaciones allí observadas están asociadas principalmente con la tasa de evapotranspiración de cada tipología.

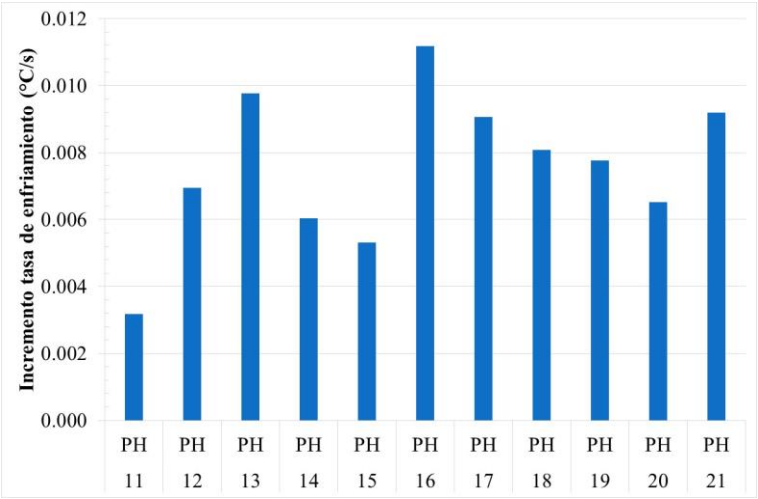


Figura 79. Incremento de las tasas de enfriamiento por los pondajes húmedos (Ver Figura 71).

La tasa de enfriamiento representa el cambio de temperatura en un determinado intervalo de tiempo, por lo cual puede variar según las condiciones climatológicas de la zona. Por lo tanto, no es posible determinar el efecto global en Ciudad Verde por la implementación de SUDS a partir de este parámetro, pues sería necesario contar con información de temperatura ambiental con la misma resolución que la tasa

de enfriamiento. Así pues, se utilizó la razón entre la energía necesaria para evapotranspirar el agua y la radiación neta en cada zona, que representa una medida indirecta del efecto de enfriamiento de la vegetación, para valorar este efecto [114]. Para ello se calculó dicha razón para una condición con y sin la implementación de las tipologías y posteriormente se determinó el incremento de la energía utilizada para evapotranspirar agua para la primera condición con respecto a la segunda.

En la condición que no considera la implementación de SUDS, se asume que las zonas verdes son las principales responsables de la absorción de energía para evapotranspirar agua. El valor de la razón obtenido para este caso fue de 0.0668 e indica que por cada unidad de radiación neta 0.0668 es utilizada para evapotranspirar agua, lo cual se vería reflejado en una disminución en la temperatura ambiental. El valor obtenido para la condición que considera la implementación de las tipologías fue de 0.0669, esto significa que el consumo de energía aumentó 0.00218 veces. Adicionalmente, se determinó el incremento en la evapotranspiración del plan parcial al considerar la implementación de SUDS. Los resultados para la condición sin y con la implementación de SUDS fueron respectivamente 0.3557 y 0.3566. Este último presenta un incremento de 0.00261 con respecto al primero, lo cual es consistente con el incremento de la energía requerido para los procesos de evapotranspiración.

El valor económico asociado al servicio de provisión del agua se determinó a partir de la metodología de costos de mercado, la cual hace referencia al dinero que se paga por los bienes y servicios provistos por los ecosistemas que se comercian en mercados reales [115]. En este caso fue utilizado el valor comercial del agua, el cual está representado por la tarifa del consumo básico establecida por la EAB para el año 2018 ($ 2,115/m^3) [116]. Sabiendo que el flujo total de agua estimado para irrigación fue de 142,757 m^3/año, se determinó que el ahorro por utilizar agua almacenada en los pondajes es de $ 349,980,472.

Adicionalmente, el valor económico asociado al servicio de regulación del agua se determinó a partir de la metodología de costos evitados, la cual hace referencia a los costos de las medidas adoptadas para evitar los daños que se producirían si no existiera un servicio ecosistémico [115]. En este caso fue utilizada la tasa retributiva por vertimientos puntuales para el año 2018. Esta corresponde a un instrumento económico empleado por la autoridad ambiental competente para cobrar a los usuarios que generan vertimientos puntuales directos o indirectos a los cuerpos de agua. Así pues, se cobra por la totalidad de la carga contaminante descargada al recurso hídrico. Los valores por descarga de DBO y SST utilizados fueron respectivamente $144.39/Kg y $61.75/Kg [117].

En la Figura 80 se presentan las cargas contaminantes asociadas a los flujos de agua regulados por cada tipología y, en la Tabla 90, los resultados de la valoración económica del servicio. A pesar de que el agua total regulada por las tipologías fue de 68,671.56 m^3/año y que las cargas de DBO y SST no vertidas al sistema de drenaje fueron respectivamente 618.04 Kg/año y 3 296.23 Kg/año, el costo evitado por vertimientos fue muy bajo ($ 313,561) en comparación con el ahorrado por uso del agua en actividades de irrigación ($ 301,988,134).

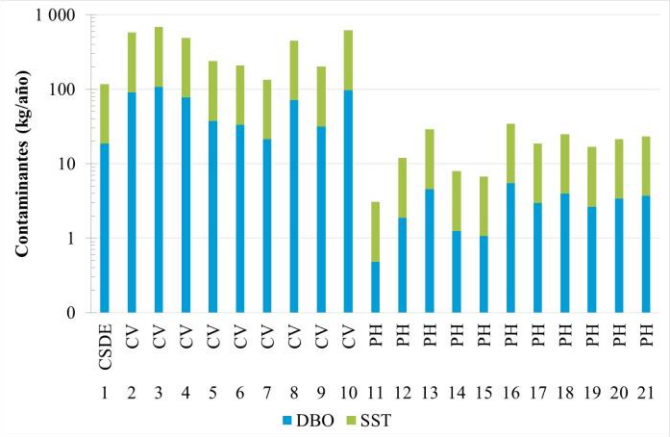


Figura 80. Cargas contaminantes asociadas a los flujos totales de agua regulados (Ver Figura 71).

Tabla 90. Valor económico asociado a los flujos de agua regulada

Parámetro	Cuantificación	Valor económico
Carga total de DBO (kg/año)	618.04	$ 95,580.51
Carga total de SST (kg/año)	3,296.23	$ 217,980.01
	Total	$ 313,560.52

6.3.3. Suministro y uso de la energía

En una microciudad como lo es Ciudad Verde, la fuente de emisiones principal por parte del sector energía viene de los recursos energéticos que se consumen, en este caso principalmente, electricidad y gas natural. Estos recursos energéticos son consumidos para generar energía eléctrica y térmica para suplir necesidades básicas del hogar tales como iluminación, cocción, aseo, aseo personal y entretenimiento. Las medidas de mitigación propuestas para las emisiones del sector están orientadas, por un lado, a generar la energía eléctrica y térmica de manera distribuida (dentro del macroproyecto), y, por otro lado, a incentivar la eficiencia energética (entendiendo este concepto como reducir el consumo sin comprometer las necesidades básicas de los usuarios). La mayoría de las medidas que se plantean en el sector energía definido para este proyecto se enfocan en la generación distribuida de energía eléctrica y térmica en edificios residenciales. Una de las medidas que se expone a continuación mitiga las emisiones por consumo de energía eléctrica del alumbrado público (fuente de emisión considerada en la evaluación de la línea base de este sector). Respecto a la eficiencia energética, se propone la implementación de medidores inteligentes. Otras medidas de eficiencia energética en edificios residenciales se exponen en la sección del sector edificaciones e infraestructura urbana (6.3.6).

Tabla 91. Medida 1. Sistemas fotovoltaicos en techos de conjuntos residenciales

Medida 1:	Sistemas fotovoltaicos en techos de conjuntos residenciales
Categorización:	Energía / Generación de energía / Energías descarbonizadas
Categorización alternativa:	Energía / Producción de energía
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: se propone la implementación de sistemas de paneles fotovoltaicos con almacenamiento en los techos de los edificios de los conjuntos residenciales a partir del año 2025 tal que se cubra la demanda de electricidad en un 30%. El potencial solar en los techos de Ciudad Verde puede llegar la totalidad de la demanda residencial a partir de su implementación en condiciones ideales, tales como que los techos soporten la totalidad de carga impuesta por los paneles y su sistema de montaje, y que la regulación para generación distribuida permita la implementación de las capacidades resultantes (Comisión de Regulación de Energía y	

Medida 1:	Sistemas fotovoltaicos en techos de conjuntos residenciales

Gas (CREG), 2018).

En el escenario de referencia, Ciudad Verde no contempla la implementación de tecnologías de generación. Por lo tanto, esta medida permitiría suplir parcialmente las necesidades de energía eléctrica en Ciudad Verde, así como habilitar la exportación de energía y pensar a los conjuntos residenciales como prosumidores. Por último, si se contemplase la implementación de almacenamiento, ello contribuiría a la resiliencia energética del sector residencial, dado que permitiría suplir la demanda a lo largo del día. Sin embargo, debido a los altos costos de inversión que ello implica y considerando que se los excesos de energía son exportados a la red, los resultados finales del modelo no consideraron almacenamiento.

De las encuestas aplicadas, se concluye que hay un interés importante por parte de los habitantes de Ciudad Verde en la implementación de este tipo de medida, tal y como se observa en la Figura 81, contrastado a su vez con los resultados expuestos de las entrevistas a grupos focales.

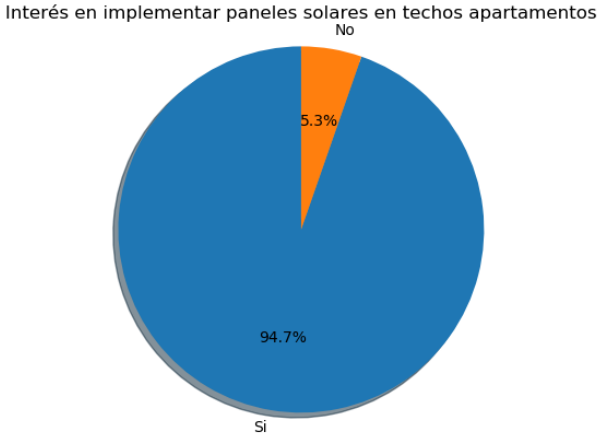


Figura 81. Resultados a la pregunta: ¿Si vive en edificio, estaría interesado en que se implementen paneles solares para el suministro de energía para iluminación, seguridad y los apartamentos?

En esta encuesta a su vez se preguntó a los encuestados cuánto estarían dispuestos a contribuir mensualmente para la implementación de esta tecnología. En la Figura 82 la pregunta es de carácter abierto, pero los resultados se presentan por rangos y el límite inferior es inclusivo. Se puede observar que alrededor del 81.5% de los encuestados están dispuestos a contribuir mensualmente a la implementación de estos sistemas, e inclusive es de destacar que esta contribución no es despreciable, resultando en que el 50% de los encuestados están dispuestos a contribuir entre $5.000 y $25.000; por lo tanto, se puede pensar en esta contribución como un cobro adicional al recibo de energía para compensar la diferencia entre los costos de energía de comprar directamente al operador, y de implementar y operar el sistema de generación fotovoltaica en el periodo de análisis.

Medida 1:	Sistemas fotovoltaicos en techos de conjuntos residenciales

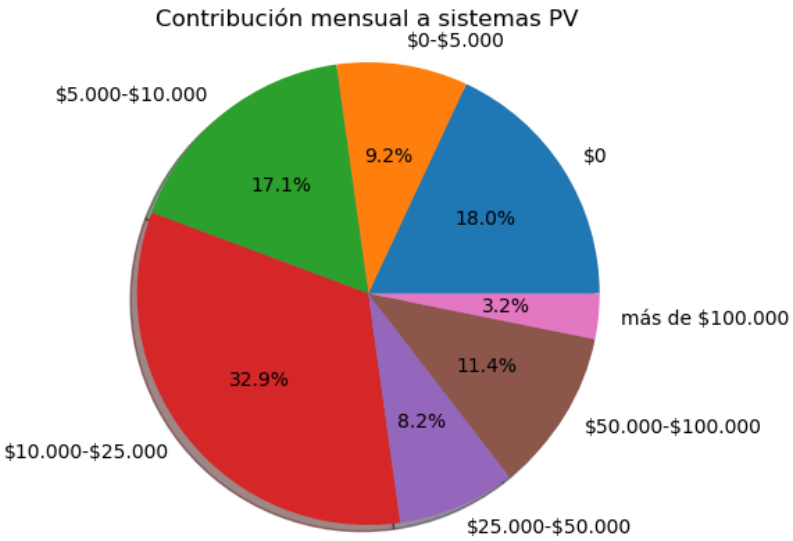


Figura 82. Resultados a la pregunta: ¿Con cuánto estaría dispuesto a contribuir mensualmente para la implementación de esta tecnología (paneles fotovoltaicos)? Si no estaría dispuesto a dar una cuota mensual, ponga cero. La respuesta era de carácter abierto, pero los resultados se presentan por rangos. El límite inferior es inclusivo.

Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	30594.76
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	369.86 USD 2019
Incertidumbre estimación:	**MEDIA**: Datos histórico de irradiancia (recurso energético) provenientes de la base de datos pública de NREL. Estos datos pueden tener una precisión cuestionable.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	Esta medida presenta un incremento de emisiones embebidas que provienen de su transporte e instalación. El transporte incluye la importación de los diferentes materiales y el transporte al sitio de instalación. Por parte de la instalación, si bien esta medida no es invasiva en su implementación, adaptar el sistema eléctrico de los edificios puede generar una serie de residuos de escombros que deben ser propiamente tratados.
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Edificio en construcción o construido recientemente: Urbanizador, constructor. Edificio existente: administración del edificio/conjunto residencial. General: empresa suministradora de energía a cargo del sistema de distribución, residentes propietarios de viviendas.
Indirecto	Administración Pública, Ministerio de Minas y Energía.
Factibilidad	
Financiera	**BAJA:** El costo de inversión de sistemas fotovoltaicos para instalaciones residenciales y comerciales sigue siendo alto contrastado con sistemas de gran escala. Sin embargo, estos costos siguen una

Medida 1:	Sistemas fotovoltaicos en techos de conjuntos residenciales
	tendencia decreciente, por lo que su factibilidad financiera cambiará con los años. La inversión puede ser recuperada en un horizonte más amplio al considerado en este análisis.
Técnica	**ALTA:** La instalación de sistemas fotovoltaicos solo implica una adaptación del sistema eléctrico de las instalaciones, cuyo proceso no implica un compromiso fuerte en la factibilidad. El factor que puede afectar la factibilidad técnica es la capacidad de soporte de los techos para los paneles y su sistema de montura.
Regulatoria	**MEDIA:** En Colombia a través de la Ley 1715 de 2014 se han provisto incentivos que promueven la implementación de tecnologías como las contempladas en esta medida. Sin embargo, dicha implementación se ve restringida por las regulaciones relacionadas con la capacidad de los generadores y capacidad de exportación implementables, orientado a la estabilidad de la red de distribución existente, como la CREG 030 de 2016, la cual restringe ampliamente las capacidades instalables de la generación distribuida y la energía exportable. Este tipo de regulaciones actualmente restringen ampliamente la capacidad de autonomía que una edificación puede llegar a tener, por lo que puede considerarse una restricción más laxa para las capacidades de los generadores y la energía exportable.
Social	**ALTA:** Como se puede concluir a partir de los resultados de la encuesta a Ciudad Verde, existe una percepción positiva acerca de la implementación de esta tecnología, e inclusive existe una disposición de pago para que se puedan implementar.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	Autogeneración de energía renovable en conjuntos residenciales
	Reducción de pérdidas en la distribución de energía
	Costo unitario de energía (LCOE) es mayor con respecto al precio de energía del sistema tradicional.
	Medida invasiva en techos. Se requiere buscar sinergias con medidas de mitigación de otros sectores asociadas a techos tales como techos verdes.
	Debido a la naturaleza de los edificios del caso de estudio, puede llegar a ser necesario realizar un reemplazo del material de los techos de cada edificio.
	Impacto muy positivo en la oferta de recursos renovables naturales.
	Impacto positivo en la educación.

Tabla 92. Medida 2. Sistemas de energía solar térmica a través de colectores solares

Medida 2:	Sistemas de energía solar térmica a través de colectores solares
Categorización:	Energía / Generación de energía / Energías descarbonizadas
Categorización alternativa:	Energía / Producción de energía
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: se propone la implementación de colectores solares térmicos para el precalentamiento de agua caliente en techos de edificios residenciales a partir de 2025. Considerando que las horas para las cuales se demanda agua caliente no coinciden necesariamente con las horas en las cuales se capta energía para calentamiento de agua, un tanque auxiliar de almacenamiento térmico es necesario para este sistema. El sistema calienta el agua alrededor de los 30° siempre y cuando sea posible. En caso de que no sea suficiente para cumplir este requerimiento, serviría como sistema de precalentamiento de agua. En ambos casos existiría reducción en el consumo ya sea de gas o electricidad de los sistemas de calentamiento que ya existen en los hogares. Este sistema comprende un número de colectores y volumen del tanque de almacenamiento por edificio propuesto en la Tabla 93 Dimensionamiento de sistema de precalentamiento solar de agua en edificios	

Medida 2:	Sistemas de energía solar térmica a través de colectores solares

Tabla 93 Dimensionamiento de sistema de precalentamiento solar de agua en edificios

Número de pisos	**Número de colectores**	**Volumen tanque (m3)**
6	10	4
8	15	5
12	20	7
Casa	1	0.2

En el escenario de referencia, Ciudad Verde no contempla la implementación de tecnologías de generación térmica. Por lo tanto, esta medida permitiría suplir parcialmente las necesidades de calentamiento de agua en Ciudad Verde.

De las encuestas aplicadas, se concluye que hay un interés importante por parte de los habitantes de Ciudad Verde en la implementación de este tipo de medida, tal y como se observa en la Figura 83, aunque es ligeramente reducido con respecto a la generación eléctrica solar.

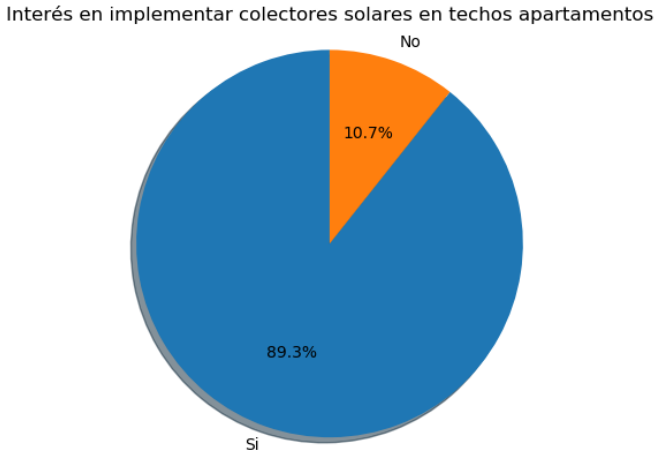


Figura 83. Resultados a la pregunta: ¿Si vive en edificio, estaría interesado en que se implemente un sistema de calentamiento de agua que utilice fuentes limpias; por ejemplo, ¿energía solar en su casa o edificio de residencia?

Dentro de esta encuesta a su vez se preguntó a los encuestados cuánto estarían dispuestos a contribuir mensualmente para la implementación de esta tecnología. En la Figura 84 se puede observar que alrededor del 77.7% de los encuestados están dispuestos a contribuir mensualmente a la implementación de estos sistemas, e inclusive es de destacar que esta contribución no es despreciable, resultando en que el 53.8% de los encuestados están dispuestos a contribuir entre $5.000 y $25.000. Es necesario realizar un análisis similar al propuesto en la Medida 1 y concluir respecto qué tanto de la diferencia entre los costos de generación de energía térmica e importar gas y electricidad de las redes de distribución se puede suplir, que se espera sea considerablemente más alta que paneles fotovoltaicos considerando una revisión preliminar de los costos de capital en el Annual Technology Database de NREL (NREL, 2019)

Medida 2:	Sistemas de energía solar térmica a través de colectores solares

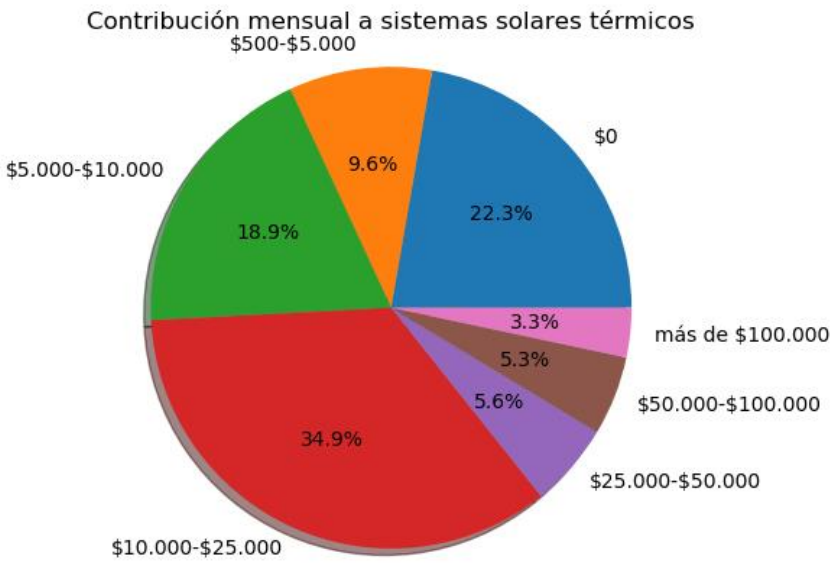


Figura 84. Resultados a la pregunta: ¿Con cuánto estaría dispuesto a contribuir mensualmente para la implementación de esta tecnología (generación térmica)? Si no estaría dispuesto a dar una cuota mensual, ponga cero. La respuesta era de carácter abierto, pero los resultados se presentan por rangos. El límite inferior es inclusivo.

Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	54393.76
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	830.78 USD 2018
Incertidumbre estimación:	**ALTA**: Datos histórico de irradiancia (recurso energético) provenientes de la base de datos pública de NREL. Estos datos pueden tener una precisión cuestionable. La estimación de la demanda de agua caliente y el perfil de demanda se hicieron bajo suposiciones de los grupos de energía y aguas. Un perfil apropiado de consumo en edificios y casa es necesario.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	Esta medida presenta un incremento de emisiones embebidas que provienen de su transporte e instalación. El transporte incluye la importación de los diferentes materiales y el transporte al sitio de instalación. Por parte de la instalación, esta medida es altamente invasiva debido a que requiere la restructuración de la infraestructura del edificio para la adaptación de una red dedicada de agua caliente para la circulación del agua del sistema colectores y tanque de almacenamiento a lo largo del edificio. Esto puede conllevar a una cantidad considerable de residuos de escombros que deberán ser apropiadamente tratados.
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Edificio en construcción o construido recientemente: Urbanizador, constructor. Edificio existente: administración del edificio/conjunto residencial.

Medida 2:	Sistemas de energía solar térmica a través de colectores solares
	General: empresa suministradora de energía a cargo del sistema de distribución, residentes propietarios de viviendas.
Indirecto	Administración Pública, Ministerio de Minas y Energía.
Factibilidad	
Financiera	**BAJA:** El costo de inversión de colectores solares y tanque de almacenamiento térmico para instalaciones residenciales y comerciales es alto. Sin embargo, estos costos siguen una tendencia decreciente, por lo que su factibilidad financiera cambiará con los años. Sin embargo, en el análisis no se consideraron los costos de adaptación de infraestructura de los edificios ya existentes, lo que puede representar un costo considerable sobre el capital inicial.
Técnica	**BAJA:** En microciudades construidas como lo son Ciudad Verde, la instalación de este tipo de sistemas requiere la adaptación de la infraestructura del edificio para la instalación de un sistema de distribución de agua caliente dedicado para cada edificio. Esta restricción reduce ampliamente la factibilidad técnica de su implementación.
Regulatoria	**MEDIA:** Actualmente desde la regulación energética no existe particularmente una barrera que afecte la implementación de este tipo de sistemas
Social	**ALTA:** Como se puede concluir a partir de los resultados de la encuesta a Ciudad Verde, existe una percepción positiva acerca de la implementación de esta tecnología, e inclusive existe una disposición de pago para que se puedan implementar.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	Autogeneración de energía renovable en conjuntos residenciales.
	Reducción de pérdidas en la distribución de gas.
	Reducción en la demanda de electricidad y gas utilizada para duchas y calentadores a gas.
	Alto costo de capital.
	Medida invasiva en techos. Se requiere buscar sinergias con medidas de mitigación asociadas a techos tales como techos verdes.
	Medida invasiva en edificios. Requiere la adaptación de un sistema dedicado de tuberías para la distribución de agua caliente sobre la infraestructura del edificio.
	Debido a la naturaleza de los edificios del caso de estudio, puede llegar a ser necesario realizar un reemplazo del material de los techos.
	Impacto muy positivo en la oferta de recursos renovables naturales.
	Impacto positivo en calidad del aire. Debido a la reducción en los gases emitidos por la quema de gas en calentadores.
	Impacto positivo en la educación.

Tabla 94. Medida 3. Alumbrado público solar

Medida 3:	Alumbrado público solar
Categorización:	Energía / Generación de energía / Energías descarbonizadas
Categorización alternativa:	Energía / Producción de energía
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: se propone el reemplazo gradual en el periodo de 2021 a 2030 del parque lumínico con el que cuenta Ciudad Verde; específicamente, las luminarias con las que cuenta el macroproyecto. Esta medida permitirá que el alumbrado público en Ciudad Verde sea autosuficiente, mitigando completamente la contribución a las emisiones por consumo de electricidad durante la operación. En el escenario de referencia, Ciudad Verde contempla que el reemplazo del parque lumínico se mantendrá con bombillas de sodio y que en el periodo no ocurrirá un reemplazo por tecnologías de iluminación eficientes (LED). La implementación de esta medida involucra no solamente un sistema de generación independiente para la luminaria, sino la implementación de bombillas LED, las cuales presentan ventajas sobre las de sodio tales	

Medida 3:	Alumbrado público solar
como mejores características de iluminación para el mismo consumo de potencia, o en otras palabras, menor consumo de potencia para las mismas características de iluminación. Lo anterior es ideal para Ciudad Verde debido a, como se concluyó de los grupos focales, el alumbrado público presenta deficiencias en términos de intensidad de iluminación y posiblemente de cobertura también. Una de las barreras aparentes para la implementación de esta tecnología en términos económicos es su alta inversión inicial y su posible efecto en el impuesto por alumbrado público que existe actualmente en Soacha. La aplicación de esta medida puede afectar severamente el cobro de este impuesto, afectando el pago por el servicio por parte de los usuarios.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	2770.89
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	USD 2018
Incertidumbre estimación:	**MEDIA**: Se asume el perfil de consumo y consumo nominal del parque lumínico de Ciudad Verde
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	Esta medida presenta un incremento de emisiones embebidas que provienen de su transporte e instalación. El transporte incluye la importación de los diferentes materiales y el transporte al sitio de instalación. Por parte de la instalación, esta medida implica el reemplazo de las luminarias existentes, lo que afecta las emisiones resultantes del tratamiento de este tipo de residuo.
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Empresa operadora del parque lumínico (SOCILUZ), empresa suministradora y operadora del sistema de distribución.
Indirecto	Habitantes de Ciudad Verde, Ministerio de Minas y Energía.
Factibilidad	
Financiera	**MEDIA:** El costo de inversión de la luminaria con su sistema de generación independiente presenta un alto costo de inversión con respecto al reemplazo de luminarias por tecnologías más eficientes. Sin embargo, la recuperación de la inversión se logra en un periodo cercano al horizonte de análisis.
Técnica	**ALTA:** La instalación de esta tecnología solo comprende el reemplazo de la luminaria de cada uno de los postes de iluminación de la microciudad.
Regulatoria	**ALTA:** En Colombia a través de la Ley 1715 de 2014 se han provisto incentivos que promueven la implementación de tecnologías como las contempladas en esta medida. No se encuentran barreras regulatorias con respecto a la autosuficiencia energética de sistemas de alumbrado público.
Social	**ALTA:** Si bien no se hicieron preguntas explícitas al respecto en la encuesta desarrollada en Ciudad Verde con respecto al alumbrado público, se esperaría una respuesta similar con respecto a la instalación de estos sistemas en el sistema de alumbrado, sobre todo si ello implica aliviar los problemas con los que cuenta actualmente la microciudad. Sin embargo, puede existir una reacción en contra si su implementación implica un aumento en el impuesto que los ciudadanos de Soacha pagan mensualmente por el sistema
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	Instalación adaptable a la infraestructura existente.
	Resiliencia tanto en términos de su autonomía como de independencia de la red.
	Alto costo de capital.
	Mejora en la iluminación que provee el sistema con respecto a la iluminación provista por las bombillas de sodio que se encuentra

Medida 3:	Alumbrado público solar
	actualmente. Ello puede implicar una mejora a su vez en la percepción de seguridad de los ciudadanos

Tabla 95. Medida 4. Medición inteligente

Medida 4:	Medición inteligente
Categorización:	Energía / Eficiencia energética
Categorización alternativa:	Energía / Demanda de energía
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: se propone el reemplazo gradual y adopción de medidores inteligentes de energía sobre las diferentes unidades de vivienda en Ciudad Verde. Esta medida permitirá empoderar al usuario al hacerlo más consciente sobre su consumo al proveer información en tiempo real acerca de sus patrones de consumo, el cobro de la energía que ha consumido, entre otros posibles beneficios. De esta manera, se busca que el usuario sea un agente participe del mercado eléctrico dado que, al ser más consciente de sus hábitos de consumo y cómo evoluciona su cobro, el usuario puede responder ante posibles cambios tanto en su consumo como en el precio de la energía. En otras palabras, se vuelve una tecnología habilitante para la implementación de estrategias de respuesta de la demanda. Por último, es de destacar que esta medida se considera más una medida de mejora que de mitigación. Si bien en un escenario ideal se espera que esta tecnología permita promover eficiencia energética y gestión de la demanda, y con ello generar una reducción en las emisiones por consumo, esto no necesariamente será lo que se verá reflejado en la realidad. A su vez, es necesario monitorear la percepción de los usuarios con respecto a esta tecnología, y si efectivamente se está logrando un uso por parte de estos y si existe un efecto significativo en los patrones de consumo	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	No estimada
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	No estimada
Incertidumbre estimación:	La estimación del impacto de emisiones requeriría la suposición de un cambio en los patrones de comportamiento de los usuarios, lo cual puede afectar de gran manera la incertidumbre en la estimación.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	Emisiones embebidas por transporte de los medidores hacía las edificaciones donde serán instalados.
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Usuarios, empresa suministradora de electricidad.
Indirecto	Gobierno local, administración de edificaciones/conjuntos residenciales, Ministerio de Minas y Energía.
Factibilidad	
Financiera	La forma de financiación de este tipo de sistemas aún es un tema de discusión en Colombia.
Técnica	**ALTA:** La implementación técnica de este tipo de sistemas no presenta una barrera particular.
Regulatoria	**ALTA:** En materia de regulación, el Ministerio de Minas y Energía y la CREG se encuentra desarrollando un proyecto de resolución de Infraestructura de Medición Inteligente a través del cual buscan establecer las condiciones y actores responsables de la implementación de este tipo de tecnologías.
Social	**ALTA:** A pesar de que el conocimiento sobre medición inteligente en los habitantes del macroproyecto no es amplio, la encuesta en Ciudad Verde refleja un interés en su mayoría alto respecto a la medición inteligente. Es importante que se considere una capacitación apropiada de los ciudadanos para que exista una apropiación de esta tecnología y

Medida 4:	Medición inteligente
	genere un impacto positivo en los patrones de consumo.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	Tecnología habilitante para el monitoreo detallado de patrones de consumo, lo que permitiría pensar en gestión energética tanto a nivel de demanda como a nivel de generación distribuida.
	Existen retos importantes en cuanto a su adecuada adopción por partes del usuario que han sido destacados en otras ciudades del mundo. (Department for Bussiness Energy & Industrial Strategy, 2017)
	Riesgo de bajo efecto de estrategias de gestión energía debido a la baja elasticidad en la demanda.

En la Figura 85 se presentan las curvas de emisiones que demuestra las emisiones en línea base y la mitigación que conllevan las medidas asociadas a la implementación de paneles fotovoltaicos para generación de energía eléctrica y colectores solares para el calentamiento de agua (energía térmica) para aseo personal. Estas medidas tienen la particularidad de que comparten el mismo espacio para su implementación. Las medidas fueron dimensionadas de tal manera que no existiera conflicto con respecto al espacio disponible. Sin embargo, el modelo contempla diferentes portafolios que representan combinaciones de estas dos medidas de tal manera que se preserve el espacio disponible en los techos. Es de destacar que la línea base con respecto a la cual se presenta la mitigación corresponde a la integración de la línea base del consumo energético en edificaciones residenciales y la línea base por consumo de electricidad por parte del alumbrado público.

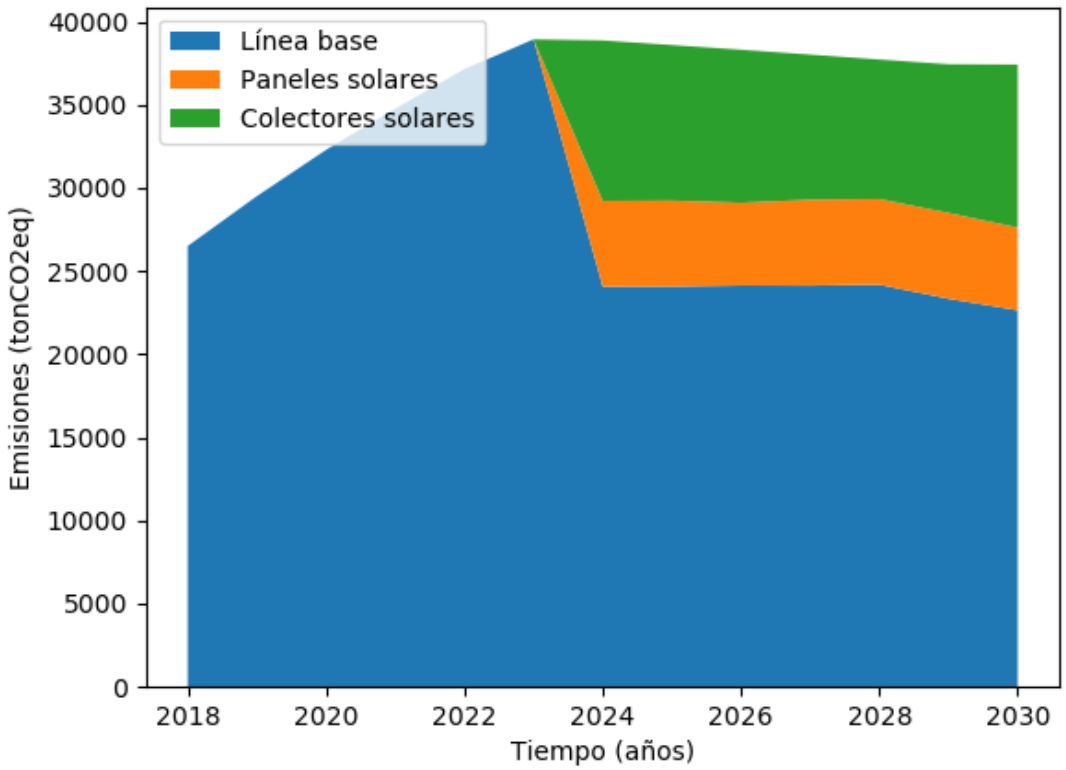


Figura 85. Perfil de emisiones de las medidas propuestas para el sector energía y línea base

Se puede observar que existe un efecto significativo en las emisiones en la mitigación de las emisiones acorde a como fueron propuesta la aplicación de estas medidas. Por parte de los sistemas fotovoltaicos, se

propone la medida de tal manera que se tenga una reducción de alrededor del 30% de las emisiones causadas por consumo de electricidad. Las emisiones mitigadas acumuladas por esta medida equivalen a 35744.44 $tCO_{2\text{-}eq}$ equivalentes al 13.4% de las emisiones por consumo energético a partir del año de su implementación. Como se destacó en la descripción de la medida, en Ciudad Verde existe un potencial de autosuficiencia eléctrica del 100%; es decir, es posible cubrir el total de la demanda actual y proyectada en Ciudad Verde. Sin embargo, lograr este objetivo tiene dos obstáculos importantes: el primero corresponde al exceso de energía que resulta del sistema fotovoltaico. Al considerar una alta penetración de sistemas fotovoltaicos, la franja horaria para la cual se presenta la mayor parte de la generación excede la demanda que se debe cubrir. Una de las formas de aliviar esta contingencia es contemplar un sistema de almacenamiento que permita desplazar esta generación a franjas horarias en las cuales no se tendrá generación alguna como son periodos de 6 pm a 6 am. Sin embargo, el modelo descarta esta opción debido a los altos costos que aún implican los sistemas de almacenamiento, sobre todo considerando que preferiría optar por la opción más económica que correspondería a importar energía de la red. La segunda opción corresponde a la exportación del exceso de energía hacía la red de distribución. Sin embargo, la regulación vigente orientada a venta de excedentes restringe ampliamente la energía exportable de un sistema de generación distribuido, principalmente debido a posibles inestabilidades en la red que estas pueden causar. Por lo tanto, considerar una alta autosuficiencia de electricidad a través de estos sistemas no es viable desde los ámbitos económicos, técnicos y regulatorios para Ciudad Verde. Sin embargo, en próximos años con la reducción en costos de tanto estos sistemas como los sistemas de almacenamiento, su viabilidad económica será más favorable. La regulación vigente debe contemplar la ampliación de la energía exportable de tal manera que no solamente se provea un medio para manejar los excesos, sino también sé que la venta de excesos permita mejorar la costo-eficiencia de este tipo de medida.

Por parte del sistema de colectores solares para calentamiento de agua, se presenta una mitigación acumulada de 64037.49 $tCO_{2\text{-}eq}$ equivalentes a alrededor del 24% del consumo energético desde su implementación. La medida propuesta contempla un balance entre la costo-eficiencia de la medida, y la mitigación y autosuficiencia resultante considerando que el dimensionamiento del tanque de almacenamiento y el número de colectores presentaban variables críticas sobre todo en términos de financiación. Si bien la mitigación es considerable, esta medida presenta fuertes obstáculos si se considera su implementación sobre un entorno construido como lo es Ciudad Verde. El principal obstáculo contempla el requerimiento de una red independiente de tuberías en edificios a través de la cual se pueda distribuir agua caliente del sistema colectores y tanque de almacenamiento hacía los usuarios. Ello implicaría una adaptación de la infraestructura del edificio que aumenta los costos de capital de la medida (es de destacar que los costos que implica esta adaptación no fueron contemplados en el cálculo de la costo-eficiencia). De ser posible superar este obstáculo al mínimo costo y afectando la infraestructura del edificio lo mínimo posible, el sistema de colectores solares ofrece una buena alternativa para reducir el consumo de electricidad y gas natural destinado para calentamiento de agua.

6.3.4. Gestión de residuos

De acuerdo con las fuentes de emisión identificadas en el cálculo de la línea base, hallazgos y propuestas resultantes de los grupos focales con los habitantes de Ciudad Verde, y la revisión de medidas para la gestión de residuos a nivel nacional e internacional, se formulan seis alternativas para mejorar la gestión de los residuos del caso de estudio. En este sentido, se proponen dos opciones que se enfocan en la mitigación de GEI generados por la descomposición anaerobia de residuos rápidamente putrescibles en el relleno sanitario. Siguiendo la jerarquía de la gestión de residuos, las medidas mencionadas favorecen el aprovechamiento, en este caso bioquímico, por encima de la disposición final o la incineración. Del mismo modo, se propone una alternativa para aumentar el aprovechamiento de material reciclable tradicionalmente recolectado. Se propone además una medida para quemar el biogás del relleno sanitario, en caso de que los residuos rápidamente putrescibles sigan disponiéndose en estos sitios. A pesar de tratarse de la opción menos privilegiada dentro de la jerarquía de residuos, esta alternativa se evalúa por

su potencial de mitigación y porque puede constituirse como un paso transitorio hacia opciones que favorezcan el aprovechamiento. Respecto al transporte de residuos, se plantean dos medidas en las que los vehículos recolectores a diésel son reemplazados por camiones eléctricos y por camiones impulsados por biogás generado por la degradación de residuos.

La descripción, el potencial de mitigación, la evaluación de costo-eficiencia y otros impactos de las medidas se muestran a continuación.

Tabla 96. Medida 1. Compostaje descentralizado

Medida 1:	**Compostaje descentralizado**
Categorización:	Residuos/Gestión de residuos/Aprovechamiento de residuos
Categorización alternativa:	Residuos/Residuos sólidos
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: Se propone la instalación de una planta de compostaje dentro de Ciudad Verde desde 2022, con capacidad para 14.400 toneladas de residuos rápidamente putrescibles al año. Esta planta recibirá la totalidad de los residuos de cocina y los residuos de poda de árboles y corte de césped generados por el mantenimiento de zonas verdes en el macroproyecto de vivienda, cuya descomposición en el relleno sanitario constituye el 80% de las emisiones de GEI asociados a la disposición final de residuos en 2018. Se propone una instalación de compostaje cerrada de flujo vertical, que no requiere agitación, calentamiento externo, ni inyección de aire (Tecnología VCU). La aplicación de esta medida depende de la puesta en marcha de la recolección diferenciada de residuos, por lo que se propone implementar desde 2021 la recolección diferenciada tres veces por semana de los residuos sólidos domiciliarios generados en Ciudad Verde así: Recolección de residuos rápidamente putrescibles aprovechables dos veces por semana, junto con los no aprovechables y recolección de material reciclable una vez por semana. La implantación de la medida será total desde 2021 en coordinación con la Población Recicladora de Oficio del sector y la empresa de aseo del municipio de Soacha. La puesta en marcha de la recolección diferenciada de residuos es necesaria para garantizar la efectividad de propuestas como el tratamiento de residuos rápidamente putrescibles, por lo que también será incorporada en medidas que se plantean más adelante en esta sección. Se evalúa la aplicación in situ del compost obtenido en los proyectos de restauración ecológica propuestos por el sector de Ecología Urbana, abono de zonas verdes existentes en Ciudad Verde (propuesta realizada por ciudadanos en grupos focales), potenciales proyectos de agricultura urbana dentro de la ciudadela o comercialización del producto con mercados externos.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	**44,447.1**
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	• **57.34** • Considerando ahorros en emisiones por reciclaje: **54.70**
Incertidumbre estimación:	**ALTA:** Los parámetros para la modelación de la planta de compostaje derivan de una instalación en Reino Unido, por lo que las distancias, factores de emisión y características de operación pueden variar respecto al contexto local. Los costos fueron estimados a partir de estudios planteados para la ciudad de Bogotá.
Mitigación de emisiones de otros sectores	• Industria (Reciclaje): **2,141.4**

Medida 1:	**Compostaje descentralizado**
(tCO_2-eq):	
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Administración pública, empresa de aseo del municipio, población recicladora de oficio, comunidad, administración de los proyectos de vivienda.
Indirecto	Urbanizadores, industria agrícola, Comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico, Ministerio de Vivienda, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
Factibilidad	
Financiera	**BAJA:** El costo por tonelada reducida de CO_2-eq es mayor a 30 USD. El costo por tonelada de residuos tratada mediante el sistema de compostaje propuesto es mayor al de la disposición en relleno sanitario, sin embargo, la instalación de la planta dentro del macroproyecto de vivienda reduce los costos por transporte. La evaluación de costo-eficiencia de la medida no incluye los posibles ingresos por la comercialización del compost obtenido.
Técnica	**MEDIA:** Existe experiencia en el país con proyectos de compostaje a nivel industrial o a escala muy pequeña, pero no a nivel descentralizado como parte de un macroproyecto de vivienda de esta magnitud.
Regulatoria	**BAJA:** La regulación vigente para aprovechamiento de residuos rápidamente putrescibles exige un alejamiento mínimo de 500 m de áreas residenciales y preferiblemente localizarse en áreas con uso del suelo de expansión urbana, periurbano o rural. Esta reglamentación podría ser actualizada considerando los avances tecnológicos disponibles para la minimización de riesgos y afectaciones a la comunidad circundante.
Social	**MEDIA:** La medida puede provocar resistencia por parte de los habitantes por temor a la aparición de olores y vectores asociados al manejo inadecuado de estas plantas. Sin embargo, también puede generar la participación de la comunidad y la apropiación del proyecto obteniendo abono para parques y jardines dentro del macroproyecto.
Cobeneficios / Otros beneficios o impactos	
Ambientales	Aumento del potencial de acidificación en **47.2 t SO_2-eq** respecto a la línea base.
	Aumento del potencial de eutrofización en **19.6 t PO_4-eq** respecto a la línea base.
	Disminución de ecotoxicidad acuática en **52.5 t 1,4-DCB-eq**
	Aumento de la toxicidad humana en **8765 t 1,4-DCB-eq** respecto a la línea base.
	Mitigación de agotamiento de recursos abióticos en **22.8 t Sb-eq**
	Mitigación de **106,390.8 tCO_2-eq** considerando un enfoque de análisis de ciclo de vida (ver anexo)
	Impacto positivo en suelo y calidad de agua al disminuir la cantidad de lixiviados generados en el relleno sanitario. Potenciales beneficios en biodiversidad por la mejora de condiciones en el relleno sanitario y efectos positios en calidad del aire por la centralización y tratamiento

Medida 1:	Compostaje descentralizado
	de emisiones gaseosas generadas.
	Impacto negativo en la generación de ruido por la ejecución de actividades y operación de maquinaria.
Sociales	Impacto positivo en el empleo en el macroproyecto para construcción y operación de la planta.
	Impacto positivo en la salud por la reducción de olores y vectores.
	Impacto positivo en la educación por la capacitación a los habitantes y población recicladora de oficio como parte del esquema de recolección diferenciada.
Económicos	Impacto positivo en crecimiento económico y productividad por la elaboración de compost que puede ser comercializado. La obtención de compost a partir de los residuos evita la manufactura de fertilizantes sintéticos, lo que implica un impacto positivo en la oferta de recursos renovables naturales.

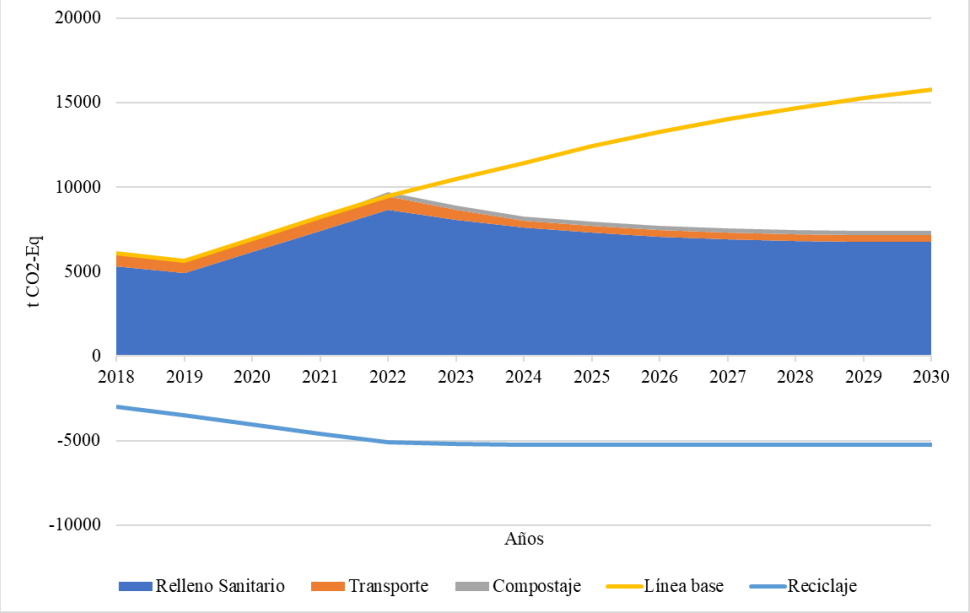


Figura 86. Perfil de emisiones del sector residuos con la implementación de compostaje descentralizado y comparación con la línea base

Tabla 97. Medida 2. Digestión anaerobia descentralizada

Medida 2:	Digestión anaerobia descentralizada
Categorización:	Residuos/Gestión de residuos/Aprovechamiento de residuos
Categorización alternativa:	Residuos/Residuos sólidos

Medida 2:	**Digestión anaerobia descentralizada**
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: Se propone la instalación de una planta de digestión anaerobia descentralizada en Ciudad Verde para iniciar sus operaciones en 2022. Esta planta recibirá la totalidad de los residuos rápidamente putrescibles domiciliarios generados en Ciudad Verde por lo que tendrá una capacidad de 14.300 toneladas al año. La implementación de esta medida, así como el compostaje, depende de la puesta en marcha de la recolección diferenciada de residuos presentada en la medida 1. El aprovechamiento de residuos orgánicos puede expandirse a los generados en actividades de barrido y limpieza de calles si se gestiona una correcta separación y recolección diferenciada para este tipo de residuos. La instalación propuesta cuenta con planta de pretratamiento, planta de hidrólisis térmica y digestión anaerobia, planta de tratamiento de gases para control de emisiones y olores, y planta de tratamiento de agua resultante del proceso. El biogás generado durante la digestión anaerobia es utilizado para la producción de energía eléctrica requerida para operar los procesos internos de la instalación y proveer energía eléctrica al macroproyecto de vivienda en caso de excedentes.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	**49,134.9**
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	• **56.54** • Considerando ahorros en emisiones por reciclaje: **55.24**
Incertidumbre estimación:	**ALTA:** Los parámetros para la modelación de la planta de digestión anaerobia derivan de una instalación en Reino Unido, por lo que las distancias, factores de emisión y características de operación pueden variar respecto al contexto local. Los costos fueron estimados a partir de información de costos unitarios de instalaciones de digestión anaerobia en países de contextos económicos similares a los de Colombia.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	• Producción de energía: **4467.8** • Industria (Reciclaje): **1151,4**
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Administración pública, empresa de aseo del municipio, población recicladora de oficio, comunidad, administración de los proyectos de vivienda.
Indirecto	Urbanizadores, industria agrícola, Comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico, Ministerio de Vivienda, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Minas y Energía
Factibilidad	
Financiera	**BAJA:** El costo por tonelada reducida de CO_2-eq es mayor a 30 USD. El costo por tonelada de residuo tratada por digestión anaerobia es mayor al de la disposición en relleno sanitario, sin embargo, gracias a la instalación de la planta dentro del macroproyecto, hay ahorros en los costos por transporte al relleno sanitario La evaluación de costo-eficiencia de la medida no incluye los posibles ingresos por la

Medida 2:	**Digestión anaerobia descentralizada**
	comercialización del compost obtenido ni por la venta de la energía eléctrica a la red.
Técnica	**MEDIA:** Existe experiencia en el país con proyectos de digestión anaerobia a nivel industrial, por ejemplo, para lodos de tratamiento de aguas residuales, pero no a nivel descentralizado como parte de un macroproyecto de vivienda.
Regulatoria	**BAJA:** La regulación vigente para aprovechamiento de residuos rápidamente putrescibles exige un alejamiento mínimo de 500 m de áreas residenciales y preferiblemente localizarse en áreas con uso del suelo de expansión urbana, periurbano o rural. Esta reglamentación podría ser actualizada considerando los avances tecnológicos disponibles para la minimización de riesgos y afectaciones a la comunidad circundante.
Social	**MEDIA:** La medida puede provocar resistencia por parte de los habitantes por temor a la aparición de olores y vectores asociados al manejo inadecuado de estas plantas. Sin embargo, también puede generar la participación de la comunidad y la apropiación del proyecto obteniendo abono para parques y jardines dentro del macroproyecto y energía eléctrica a partir de los residuos generados.
Cobeneficios / Otros beneficios o impactos	
Ambientales	Aumento del potencial de acidificación en **71.8 t SO_2-eq** respecto a la línea base.
	Aumento del potencial de eutrofización en **9.9 t PO_4-eq** respecto a la línea base.
	Aumento de la ecotoxicidad acuática en **133.2 t 1,4-DCB-eq** respecto a la línea base.
	Aumento de la toxicidad humana en **3365.8 t 1,4-DCB-eq** respecto a la línea base.
	Mitigación de agotamiento de recursos abióticos en **50.8 t Sb-eq**
	Mitigación de **106,321.8 tCO_2-eq** considerando un enfoque de análisis de ciclo de vida (ver anexo)
	Impacto positivo en suelo y calidad de agua al disminuir la cantidad de lixiviados generados en el relleno sanitario. Potenciales beneficios en biodiversidad por la mejora de condiciones en el relleno sanitario y efectos positios en calidad del aire por la centralización y tratamiento de emisiones gaseosas generadas.
	Impacto negativo en la generación de ruido por la ejecución de actividades y operación de maquinaria.
Sociales	Impacto positivo en el empleo en el macroproyecto para construcción y operación de la planta.

Medida 2:	**Digestión anaerobia descentralizada**
	Impacto positivo en la salud por la reducción de olores y vectores.
	Impacto positivo en la educación por la capacitación a los habitantes y población recicladora de oficio como parte del esquema de recolección diferenciada.
Económicos	Impacto positivo en crecimiento económico y productividad por la elaboración de compost que puede ser comercializado y los excedentes de energía resultantes del proceso. La obtención de compost a partir de los residuos evita la manufactura de fertilizantes sintéticos, lo que implica un impacto positivo en la oferta de recursos renovables naturales.

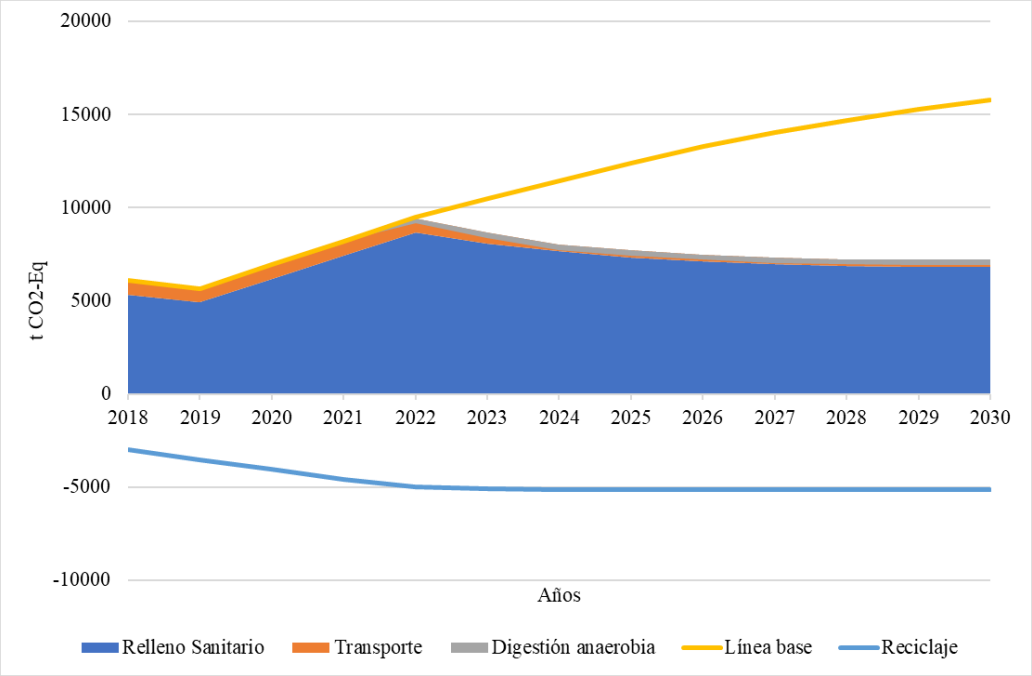


Figura 87. Perfil de emisiones del sector residuos con la implementación de digestión anaerobia y comparación con la línea base

Tabla 98. Medida 3. Instalación de estación de clasificación y aprovechamiento

Medida 3:	**Instalación de estación de clasificación y aprovechamiento**
Categorización:	Residuos/Gestión de residuos/Aprovechamiento de residuos
Categorización alternativa:	IPPU/IPPU
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: Dentro de los residuos generados por Ciudad Verde algunos residuos como el cartón, la madera y los metales presentan tasas de aprovechamiento mayores al 50%, mientras que el papel, el plástico y el vidrio son aprovechados en un porcentaje menor. A pesar de que las emisiones aportadas por la descomposición de los materiales aprovechables lentamente putrescibles (madera, papel y cartón) en el relleno no constituyen una fracción considerable de los GEI en el periodo de análisis, la importancia del aprovechamiento de estos materiales desde el punto de vista de mitigación radica en las emisiones evitadas al emplear materiales reciclados en vez de materias	

primas vírgenes en los procesos de manufactura [118]. Por esta razón, se propone la instalación en Ciudad Verde de un centro de clasificación de material aprovechable desde el año 2022 que acopie y prepare los materiales para su comercialización, respondiendo además a la propuesta para la generación de empleo realizada por encuestados en CV durante los grupos focales. La estación de clasificación recibirá inicialmente el 26% del material potencialmente aprovechable generado por Ciudad Verde, porcentaje aprovechado durante 2018 a través de estaciones de clasificación ubicadas fuera del macroproyecto de vivienda, en el municipio de Soacha. La cantidad de los residuos recibidos en la estación de clasificación aumentará escalonadamente hasta abarcar el 46% de los residuos aprovechables generados por Ciudad Verde para 2030, incrementando específicamente para este año el porcentaje de aprovechamiento del vidrio, el papel y el plástico obteniendo porcentajes de reciclaje de 30% para plástico, 56% para papel y 63% para vidrio, de manera que el nivel de aprovechamiento de estos materiales se acerque al de los demás países miembros de la OCDE [119][120][121]. Se plantea la incorporación en esta estación de clasificación de una plataforma para el intercambio de bienes reutilizables como muebles, libros, juguetes, electrodomésticos, etc.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	**893,1**
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	• **1263.5** • Considerando ahorros en emisiones por reciclaje: **67.35**
Incertidumbre estimación:	**ALTA:** Los parámetros para la modelación de la estación de clasificación y aprovechamiento y los procesos de reciclaje de diferentes materiales derivan de instalaciones en Reino Unido, por lo que las distancias, factores de emisión y características de operación pueden variar respecto al contexto local. Los costos fueron estimados a partir de estudios planteados para la ciudad de Bogotá y de los costos reportados por la empresa de aseo del municipio para la actividad de aprovechamiento.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	• Industria (Reciclaje): **16,756.8**
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Administración pública, empresa de aseo del municipio, población recicladora de oficio (PRO), comunidad, administración de los proyectos de vivienda.
Indirecto	Urbanizadores, industria, Comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico, Ministerio de Vivienda, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Factibilidad	
Financiera	**BAJA:** El costo por tonelada reducida de CO_2-eq es mayor a 30 USD. La implementación de la medida implica un alto costo de inversión inicial que no alcanza a ser igualada por los ahorros en transporte y disposición en el relleno de material aprovechable. La evaluación de costo-eficiencia de la medida no incluye los ingresos por la comercialización de los materiales clasificados y preparados en la instalación propuesta.
Técnica	**ALTA:** Existe experiencia en el país con instalaciones de este tipo que

	facilitan su construcción y mantenimiento.
Regulatoria	**ALTA:** La regulación vigente para aprovechamiento de residuos sólidos reciclables exige un retiro de mínimo 50 m de áreas residenciales, lo que eventualmente podría cumplirse con las condiciones de distribución de Ciudad Verde. Igualmente, el Departamento Nacional de Planeación formuló un Proyecto Tipo con lineamientos para la construcción de estación de clasificación y aprovechamiento de residuos sólidos - ECA[122].
Social	**MEDIA:** La medida puede provocar resistencia por parte de los habitantes por el ruido asociado a su operación o por temor a la aparición de olores o vectores provocados por el manejo inadecuado de estas estaciones. Sin embargo, la instalación de la estación dentro del macroproyecto representa una fuente de trabajo para los habitantes y mejora en las condiciones laborales de la población recicladora de oficio de la zona.
Cobeneficios / Otros beneficios o impactos	
Ambientales	Disminución de potencial de acidificación en **66.4 t SO_2-eq**
	Disminución de potencial de eutrofización en **363.4 kg PO_4-eq**
	Disminución de ecotoxicidad acuática en **24.2 t 1,4-DCB-eq**
	Disminución de toxicidad humana en **1,201.7 t 1,4-DCB-eq**
	Mitigación de agotamiento de recursos abióticos en **282.5 t Sb-eq**
	Mitigación de **25,491.1 tCO_2-eq** considerando un enfoque de análisis de ciclo de vida (ver anexo)
Sociales	Impacto muy positivo en el empleo para los habitantes del macroproyecto y la población recicladora de oficio de la zona, lo que repercute en la disminución de pobreza.
	Impacto positivo en la salud ocupacional de la PRO dedicada a la recolección de material aprovechable en Ciudad Verde por la reducción de distancia recorrida desde la fuente de generación de residuos hasta la Estación de Clasificación y Aprovechamiento, pues, según [20], el 73% de la PRO recorre más de 4 km al día, en su mayoría, en vehículos no motorizados.
	Impacto positivo en la educación por la capacitación a los habitantes y población recicladora de oficio como parte del esquema de recolección diferenciada.
Económicos	Impacto positivo en crecimiento económico y productividad por el incremento en la recolección y aprovechamiento de materiales que pueden ser comercializados. Además, esta medida permite utilizar fuentes recicladas en lugar de materias primas vírgenes para los procesos de manufactura de nuevos productos, lo que impacta positivamente la oferta de recursos naturales.

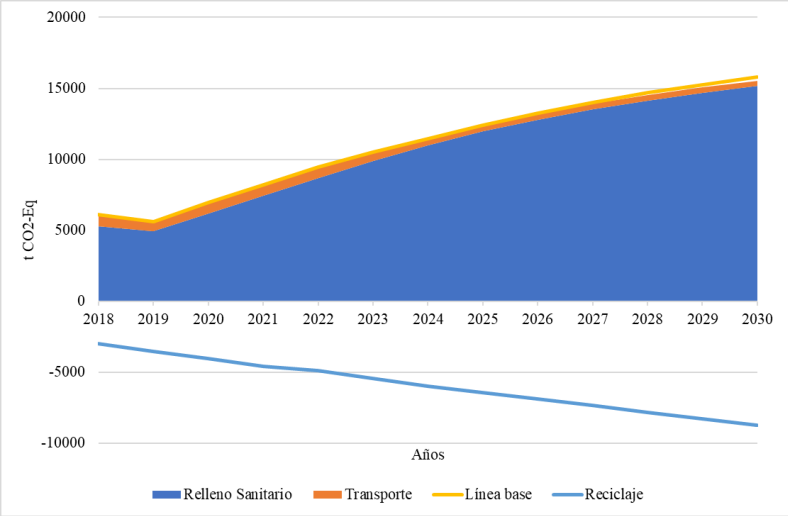


Figura 88. Perfil de emisiones del sector residuos con la instalación de una estación de estación de clasificación y aprovechamiento y comparación con la línea base

Tabla 99. Medida 4. Quema de biogás

Medida 4:	**Quema de biogás**
Categorización:	Residuos/Gestión de residuos/Disposición final de residuos
Categorización alternativa:	Residuos/Residuos sólidos
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general A pesar de que en el relleno sanitario Nuevo Mondoñedo, receptor de cerca del 87% de los residuos domiciliarios, de barrido y de poda y corte de césped generados en Ciudad Verde, quema 25% del metano generado desde 2019, las emisiones en el relleno constituyen alrededor del 95% de las emisiones de GEI del sector residuos durante el periodo de análisis. Por esta razón, se propone, como mínima medida para la mitigación de las emisiones del sector, la captura y quema en tea del 75% del gas generado en el relleno desde el año 2022 manteniendo este porcentaje hasta el año 2030.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	**74989.4**
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	2.36
Incertidumbre estimación:	**ALTA:** Los costos fueron aproximados a partir de información de costos de extracción y quema de biogás por tonelada de residuo dispuesta formulados en un estudio de la CRA [123], sin embargo, estos no representan las particularidades de la operación e inversión

	necesaria de cada sistema de captura y quema de biogás de rellenos. Para la estimación de los indicadores de Análisis de Ciclo de Vida, los parámetros para la modelación del relleno sanitario derivan de instalaciones en Reino Unido, por lo que las características de operación pueden variar respecto al contexto local.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Administración pública, empresa de aseo del municipio, operador del relleno sanitario.
Indirecto	Comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico, Ministerio de Vivienda, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Factibilidad	
Financiera	**ALTA:** El costo por tonelada reducida de CO_2-eq es menor al valor del impuesto al carbono en Colombia. Si bien la medida representa mayores costos por la extracción activa y quema de un mayor porcentaje de biogás en comparación con la línea base, la mitigación de esta medida es la más significativa entre las evaluadas, pues ataca directamente la mayor fuente de emisiones de GEI del sector.
Técnica	**ALTA:** Existe experiencia en el país con sistema de captura y quema de biogás que facilitan su construcción y mantenimiento.
Regulatoria	**ALTA:** La Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (CONPES 3874) [124] establece la expedición de reglamentación para la obligatoriedad de implementación de sistemas de extracción y captura pasiva y activa de gases de los rellenos sanitarios y su reconocimiento dentro de las tarifas del servicio público de aseo, lo que favorece la aplicación de la medida de mitigación propuesta.
Social	**ALTA:** La medida representa una mejora en la calidad de vida de los habitantes de zona cercana al relleno sanitario por la disminución en la cantidad de biogás con potenciales efectos en su salud que se libera por la descomposición de residuos en el relleno.
Cobeneficios / Otros beneficios o impactos	
Ambientales	Aumento del potencial de eutrofización en **2.04 t PO_4-eq** respecto al escenario de línea base
	Aumento del potencial de acidificación en **81.8 t SO_2-eq** respecto al escenario de línea base
	Aumento de la ecotoxicidad acuática en **1.8 t 1,4-DCB-eq** respecto al escenario de línea base
	Aumento de la toxicidad humana en **12.6 t 1,4-DCB-eq** respecto al escenario de línea base
	Mitigación de **126,885.3tCO_2-eq** considerando un enfoque de análisis de ciclo de vida (ver anexo)
Sociales	Impacto positivo en la salud de los habitantes de poblaciones cercanas al relleno, pues de acuerdo con [125] la inhalación continua de metano

	puede causar afecciones como pérdida de coordinación, náuseas y vómito.

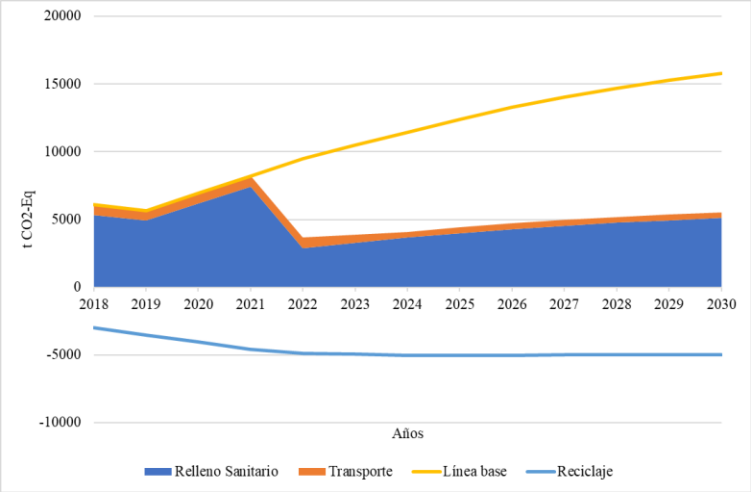


Figura 89. Perfil de emisiones del sector residuos con la implementación de la medida de quema de biogás y comparación con la línea base

Tabla 100. Medida 5. Vehículos recolectores con bajas emisiones (eléctricos)

Medida 5:	**Vehículos recolectores con bajas emisiones (eléctricos)**
Categorización:	Residuos/Consumo de energía/Reemplazo de combustibles
Categorización alternativa:	Energía/Demanda de energía
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: Dado el recorrido interno en el macroproyecto de vivienda y la distancia al relleno sanitario (en total 40 km por trayecto) para transportar los residuos desde la fuente al sitio de disposición final y que las emisiones por el transporte alcanzan representan entre 250 y 400 tCO_2-eq/año, se propone reemplazar el 100% de la flota de los camiones recolectores de los residuos domiciliarios generados por Ciudad Verde por vehículos recolectores eléctricos en el año 2021.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	**3729**
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	**58.3**
Incertidumbre estimación:	**MEDIA:** Los costos de los vehículos se estimaron a partir de datos de camiones de carga eléctricos, dada la falta de información para vehículos eléctricos recolectores de residuos en el país. Además, en el

	cálculo de los costos se asume que, en el periodo de análisis, la batería del vehículo tiene una vida útil igual a la del camión, por lo que no se considera el efecto de su desgaste y eventual necesidad de reemplazo.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Administración pública, empresa de aseo del municipio.
Indirecto	Industria automotriz, Comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Transporte
Factibilidad	
Financiera	**BAJA:** El costo por tonelada reducida de CO_2-eq es mayor a 30 USD. La implementación de la medida implica un alto costo de inversión inicial, mayor a la inversión que se realizaría si la flota se renovara con vehículos recolectores a diésel, que no alcanza a ser igualada por los ahorros combustible en el periodo de análisis. La costo-eficiencia de la medida mejora con el aumento en los factores de actividad de los vehículos.
Técnica	**MEDIA:** Existe experiencia en el país de vehículos de carga eléctricos que garantizaría su mantenimiento, sin embargo, aún no hay en el país vehículos eléctricos dedicados a recolección de residuos y la implementación de esta medida implica capacitaciones en diferentes partes de la cadena.
Regulatoria	**ALTA:** Existen incentivos y beneficios para el uso de vehículos eléctricos en Colombia, como los que se contemplan en la Ley 1964 de 2019 y la Ley 1116 de 2017, lo que facilita la implementación de la medida propuesta.
Social	**ALTA:** La implementación de la medida implica la disminución en el ruido generado por los camiones recolectores, lo que aumentaría la aceptación de los habitantes del macroproyecto y trabajadores de la empresa de aseo encargados de la recolección y transporte de los residuos.
Cobeneficios / Otros beneficios o impactos	
Ambientales	Impacto positivo en la disminución de ruido pues, de acuerdo con [126], los vehículos recolectores eléctricos generan menor ruido en comparación con los vehículos recolectores impulsados por diésel.
	Impacto positivo en la calidad del aire al evitar las emisiones atmosféricas asociadas a la combustión de diésel.
Sociales	Impacto positivo en la salud al evitar las emisiones de material particulado con el reemplazo del diésel por electricidad.
	Impacto positivo en la de la seguridad alimentaria por la sustitución del uso de diésel, el cual en el caso de Colombia un porcentaje está constituido por aceite de palma, la cual en grandes extensiones puede ocupar áreas destinadas para el cultivo de alimentos.

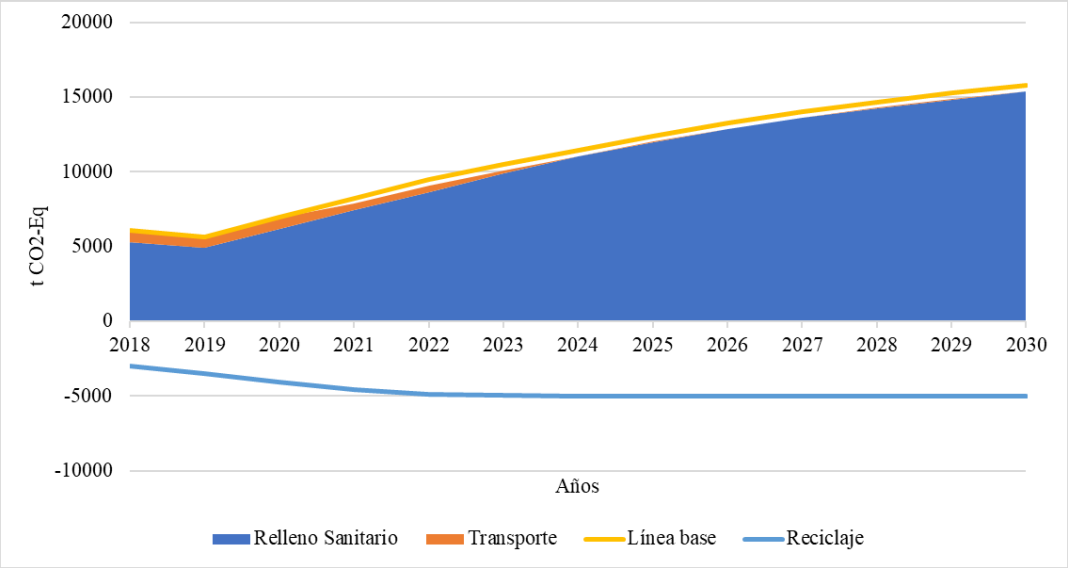


Figura 90. Perfil de emisiones del sector residuos con la implementación de la medida de vehículos de recolección eléctricos y comparación con la línea base

Tabla 101. Medida 6. Vehículos recolectores con bajas emisiones (biogás)

Medida 6:	**Vehículos recolectores con bajas emisiones (biogás)**
Categorización:	Residuos/Consumo de energía/Reemplazo de combustibles
Categorización alternativa:	Energía/Demanda de energía
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: Dado el recorrido interno en el macroproyecto de vivienda y la distancia al relleno sanitario (en total 40 km por trayecto) para transportar los residuos desde la fuente al sitio de disposición final y que las emisiones por el transporte alcanzan representan entre 250 y 400 tCO_2-eq/año, se propone reemplazar el 100% de la flota de los camiones recolectores de los residuos domiciliarios generados por Ciudad Verde por vehículos recolectores impulsados por biogás en el año 2021. Este biogás proviene de la descomposición de los residuos putrescibles en el relleno sanitario Nuevo Mondoñedo. En este caso, la infraestructura para el abastecimiento de combustible a los camiones se realizará en el relleno y se asume que para el año 2024 esta estará disponible para su puesta en operación.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	**25,984.2**
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	**5.51**

Incertidumbre estimación:	**MEDIA:** Los costos del biogás de degradación de residuos como combustible vehicular se estimaron a partir de valores que no incluyen los costos de operación del sistema público de distribución de gas y de las estaciones de recarga y fueron calculados a partir de casos en Europa Central, sin embargo, fueron utilizados como referencia para la estimación de costos en el caso de Ciudad Verde debido a la escasez de información sobre proyectos en el contexto local. En el caso de los camiones, sus costos de inversión y mantenimiento fueron estimados a partir de datos de camiones impulsados por gas natural vehicular. La estimación de la mitigación no considera emisiones por el consumo de energía en procesos de acondicionamiento del biogás para ser utilizado como combustible vehicular.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Administración pública, empresa de aseo del municipio, operador del relleno sanitario.
Indirecto	Industria automotriz, Comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico, Ministerio de Vivienda, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Transporte
Factibilidad	
Financiera	**MEDIA:** El costo por tonelada reducida de CO_2-eq es menor a 30USD. Considerando solo la mitigación por el cambio de diésel por biogás como combustible, la medida de reemplazo de vehículos recolectores a diésel por camiones impulsados por biogás tiene una costo-eficiencia de 34.5 USD/tCO_2-eq. Sin embargo, al considerar también que el biogás que alimenta los vehículos proviene de la descomposición de residuos y que, sin la implementación de la medida, el metano en este biogás sería liberado a la atmósfera como GEI, la mitigación asociada a esta medida aumenta aproximadamente seis veces, mejorando el valor de costo-eficiencia de la medida.
Técnica	**BAJA:** El uso en el país de biogás de descomposición de residuos como combustible vehicular aún se encuentra a nivel de investigaciones académicas, por lo que se requieren habilidades y experticia adicionales para implementar la medida y aprovechar, por ejemplo, la red de distribución de gas natural vehicular existente en el país.
Regulatoria	**ALTA:** Existen beneficios tributarios y descuentos para fomentar el uso de vehículos impulsados por gas natural vehicular, lo que puede facilitar la implementación de esta medida. Adicionalmente, el CONPES 3874 [124] contempla la obligatoriedad de instalación de sistemas de captura de biogás en los rellenos sanitarios, lo que favorecería su potencial uso como combustible vehicular.
Social	**ALTA:** La implementación de la medida implica la disminución la cantidad de biogás que es emitido por el relleno sanitario con potenciales impactos sobre la salud de los pobladores de áreas circundantes.
Cobeneficios / Otros beneficios o impactos	
Ambientales	Impacto positivo en la calidad del aire, pues según [5] y [6], el reemplazo de diésel por biogás en los vehículos recolectores de

	residuos genera una disminución en la emisión de PM 2.5, contaminante crítico para la calidad del aire Soacha.[9]
Sociales	Impacto positivo en la salud pues, según [5] y [6], el reemplazo de diésel por biogás en los vehículos recolectores de residuos genera una disminución en la emisión de PM 2.5.
	Impacto positivo en la de la seguridad alimentaria por la sustitución del uso de diésel, el cual en el caso de Colombia un porcentaje está constituido por aceite de palma, la cual en grandes extensiones puede ocupar áreas destinadas para el cultivo de alimentos.

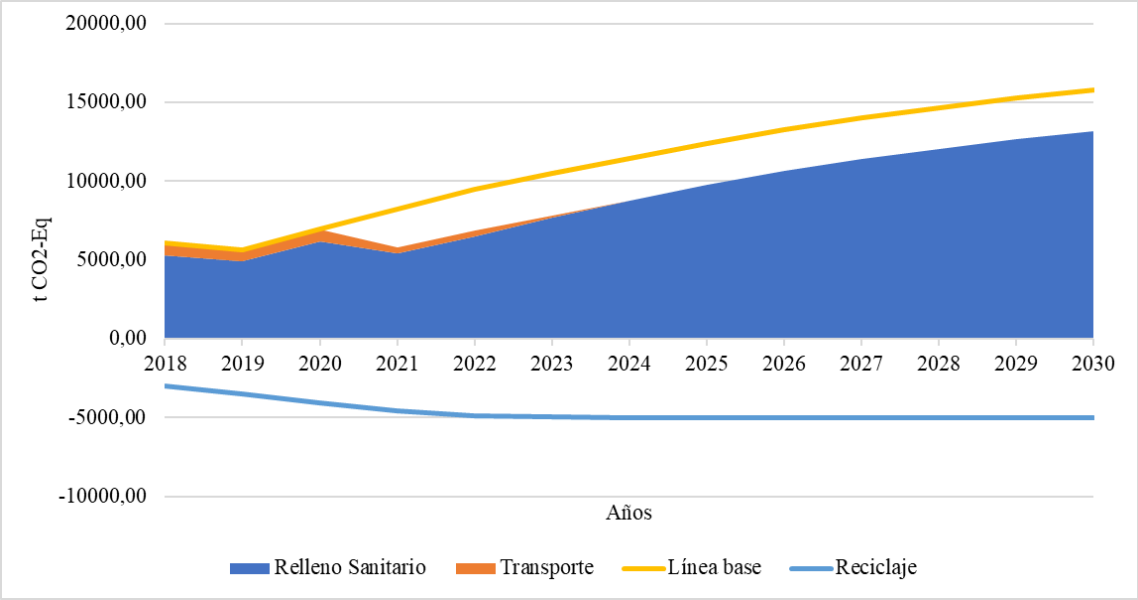


Figura 91. Perfil de emisiones del sector residuos con la implementación de la medida de vehículos de recolección impulsados por biogás y comparación con la línea base

En la imagen a continuación se muestra la comparación de la mitigación entre las seis alternativas propuestas para el sector residuos y la línea base de emisiones. Se puede observar que las alternativas que presentan mayor mitigación son las que se relacionan con el tratamiento de residuos rápidamente putrescibles y con el biogás generado por su descomposición en el relleno sanitario. Dentro de estas medidas se encuentran el compostaje descentralizado, la digestión anaerobia y la quema de un porcentaje mayor de biogás del relleno. Si bien el compostaje incorpora el tratamiento de los residuos de cocina domiciliarios y los poda y corte de césped y la digestión anaerobia se limita sólo a los residuos de cocina domiciliarios, la medida de compostaje presenta una mitigación menor que la digestión anaerobia pues esta última, además de disminuir el metano generado por los residuos en el relleno, representa ahorros en emisiones por la generación de energía para la red a partir de residuos. Esta diferencia se evidencia también en los valores de costo-eficiencia de las medidas, pues, a pesar de que el costo del compostaje (USD/t residuo) es menor en comparación con el tratamiento por digestión anaerobia y que la medida de compostaje desvía del relleno una cantidad mayor de residuos, el costo por tCO_2eq reducida resulta ser

[9] Es importante considerar que el beneficio en reducción de emisiones de PM depende también de la calidad del diésel y de la presencia de sistemas de control de emisiones. Además, cabe mencionar que la combustión de biogás genera mayores emisiones de otros contaminantes de importancia en calidad del aire como CH4, COV, HC en comparación con el diésel.

ligeramente menor para el escenario con la implementación de digestión anaerobia. Por otro lado, el incremento del porcentaje de captura y quema de biogás en el relleno sanitario es la medida que evidencia mayor mitigación de GEI en comparación con las evaluadas, además de presentar una costo-eficiencia favorable para su implementación. Sin embargo, es importante considerar los impactos ambientales, diferentes a mitigación de GEI, de continuar disponiendo los residuos aprovechables en rellenos sanitarios además de las implicaciones en la disminución de vida útil de los rellenos y el desperdicio de los materiales y energía residual disponibles en los residuos dispuestos.

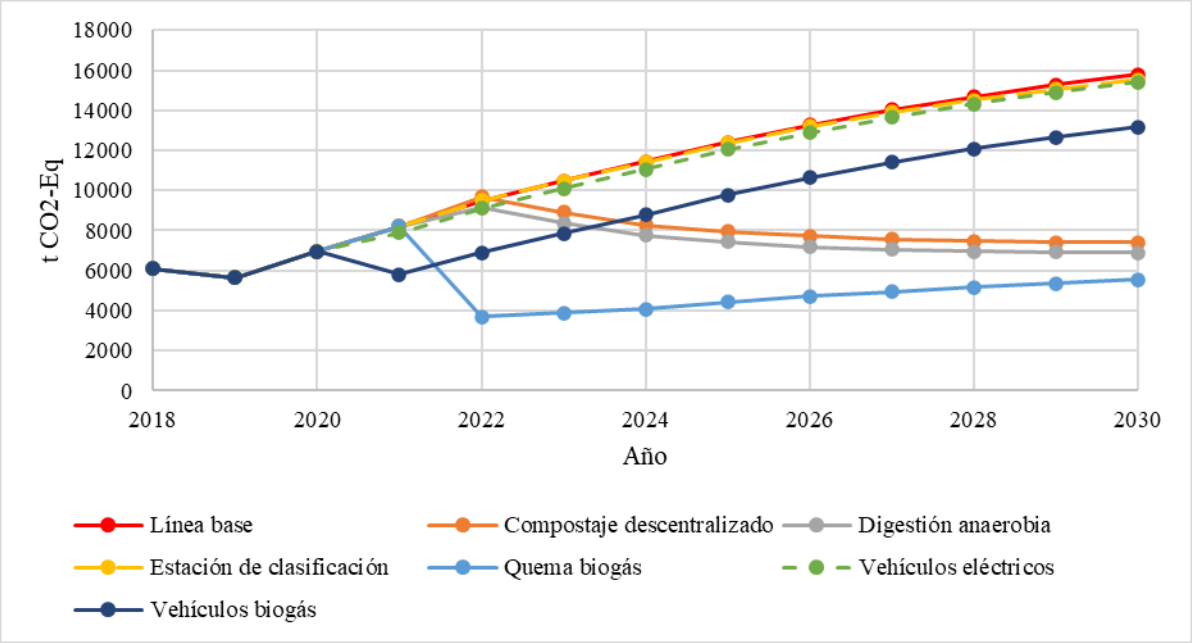


Figura 92. Comparación de perfil de emisiones de las medidas propuestas y la línea base

Por parte de la medida de instalación de una estación de aprovechamiento, la mitigación total observada de cerca de 900 tCO_2-eq corresponde al abatimiento por el desvío del relleno de residuos lentamente putrescibles como el papel y la disminución. Aunque la disminución de emisiones en los sectores analizados representa el 0.6% de las emisiones totales de la línea base del sector residuos, el impacto significativo de esta medida se encuentra en el ahorro en emisiones por el uso de material reciclado en lugar de materiales provenientes de fuentes vírgenes en procesos de manufactura (16756.8 tCO_2-eq). Además, como se observa en las fichas, esta medida representa otros beneficios en términos ambientales en acidificación, eutrofización, ecotoxicidad acuática, toxicidad humana y agotamiento de recursos abióticos; impactos positivos en aspectos como la generación de empleo, condiciones laborales de la PRO, crecimiento económico y productividad.

El transporte de residuos domiciliarios, que es el abordado por las medidas propuestas, representa el 3.5% de las emisiones del sector, por lo que su mitigación, como se observa en el caso de los vehículos eléctricos, no evidencia ser significativa en comparación con la totalidad de las emisiones del sector aun cuando reduce el 90% de las emisiones por transporte de residuos domiciliarios desde el año de implantación de la medida. Por su parte, la medida de reemplazo de camiones recolectores de residuos domiciliarios por vehículos recolectores impulsados por biogás del relleno sanitario genera la mitigación del 18% de las emisiones del sector residuos, pues, además de impactar las emisiones por el transporte de residuos domiciliarios desde 2021, disminuye las emisiones de metano generadas por el relleno al utilizar el biogás como combustible vehicular. Esto explica, además, la costo – eficiencia favorable de la medida en comparación con los vehículos eléctricos a pesar de presentar costos de inversión y mantenimiento mayores que los de la línea base. Es importante mencionar que la implementación de la medida en los

primeros años del periodo de análisis (en este caso 2021) permite percibir la mitigación asociada a la medida y obtener mejores valores de costo – eficiencia. En caso de implementar la medida hacia el final del periodo, la alta inversión inicial no podrá ser compensada con la mitigación generada evidenciando valores muy altos de costo por tCO_{2}-eq reducida.

6.3.5. Movilidad sostenible

Las medidas de mitigación para Ciudad Verde se seleccionaron teniendo en cuenta los resultados de las encuestas y los grupos focales. Las intervenciones para mejorar las condiciones actuales de la población y simultáneamente mantenerse en una senda de desarrollo de bajo carbono deberían estar enfocadas en:

i) una estrategia integral y multisectorial para aumentar la oferta y asequibilidad a servicios básicos de salud y educación (preescolar, básica, media y educación superior). Esto mejoraría la calidad de vida de la población, al mismo tiempo que tendría un impacto en la cantidad y longitud de los viajes asociados a estos servicios y por lo tanto en las emisiones GEI.

   - Se analizó el déficit de cupos escolares y se analizó información sobre la oferta de universidades y centros de salud. Se hace un análisis preliminar del impacto que se tendría en emisiones asociado al transporte, si los habitantes de CV pudieran acceder a éstos dentro de la ciudadela.

   Para estas intervenciones se hizo un análisis del potencial de mitigación de emisiones GEI, pero no se desarrolló un análisis de costos.

ii) mejorar la conexión entre la ciudadela y los sistemas de transporte público colectivo y masivo de Soacha y Bogotá, a través de una mayor oferta de servicios de transporte público, ambientalmente sostenibles y con integración tarifaria.

   - Se analizó una medida de buses alimentadores eléctricos y una medida de un sistema de bicicletas para aprovechar la infraestructura existente.

iii) reducir la exposición de la población ante la contaminación del aire asociada al transporte, en particular reducir los niveles de exposición a PM2.5 de la población que depende de los modos de transporte con los mayores niveles de concentración de material particulado fino y que hacen los viajes más largos. Con esta intervención también se logran cobeneficios en reducción de las emisiones de $CO_{2\text{-eq}}$.

   - Se evalúo una medida de electrificación de buses troncales del servicio de transporte masivo.

- **Descripción de las medidas**

En las tablas a continuación se presentan las medidas de mitigación con su descripción y un análisis de costo-eficiencia en los casos en que fue posible desarrollarlo.

Tabla 102. Medida de mitigación - Reducción del déficit de cupos escolares.

Medida 1:	Reducción del déficit de cupos escolares en la ciudadela y su potencial impacto en sector de movilidad.
Categorización:	Movilidad/Consumo de energía/Diseño urbano

Medida 1:	Reducción del déficit de cupos escolares en la ciudadela y su potencial impacto en sector de movilidad.
Categorización alternativa:	Energía/Demanda de energía
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: Ciudad Verde cuenta con tres colegios y un jardín infantil que suman una capacidad para alrededor de 10,000 estudiantes en edad escolar (5-19 años). Con base en el tamaño de la población de este grupo se estima un déficit en cupos escolares de aproximadamente 68%[10], que en la práctica debe ser superior, debido a que dichos cupos no son exclusivos para la población que habita en CV según como fue comentado en los grupos focales. Esta medida propone aumentar los cupos escolares dentro de Ciudad Verde, con la construcción de un colegio público en un área actualmente disponible para construcción de equipamientos. Suponiendo condiciones similares a las de los colegios existentes (colegio con doble jornada con capacidad de 1,440 alumnos por jornada) se lograría reducir el déficit al 60%. Un análisis grueso y preliminar muestra que se requeriría construir alrededor de 8 colegios para resolver el déficit de cupos escolares considerando las características actuales de la población[11].	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_{2}-eq):	Reducción total de emisiones acumuladas hasta el 2030: 6,254 t asociadas a un colegio. Reducción total de emisiones acumuladas hasta el 2030: 50,274 t asociadas a solucionar todo el déficit de colegios. La dificultad para evaluar el potencial de mitigación de emisiones GEI de esta medida radica en que a través de la encuesta no se recolectó información sobre patrones de viajes de la población menor de 18 años. Sin embargo, bajo los siguientes supuestos se analizó el potencial de mitigación: - construcción de un colegio con 2880 cupos; - los estudiantes tienen un patrón de viajes similar al del promedio de la población de la ciudadela; - el 50% viaja al colegio con un acompañante; - tener un colegio dentro de la ciudadela permitiría realizar los viajes en modos activos (bicicleta, caminata) para cubrir una distancia inferior a 5 km. Se obtiene un potencial de mitigación de $CO_{2\text{-eq}}$ del orden de 700 toneladas por año asociado a la construcción de un colegio. Para todo el periodo de análisis el potencial de mitigación es de 6,254 t. Esta

[10] Estos análisis fueron desarrollados por los equipos de edificaciones y movilidad para la estimación de indicadores de Ciudad Verde. El acceso a colegios se presenta evaluado a través de dos indicadores diferentes desde Edificaciones e Infraestructura y desde Movilidad.

[11] El grado de desagregación de la información actual no permite analizar el déficit de cupos por grupos de edad con mayor desagregación, ni el déficit esperado en los próximos años.

Medida 1:	Reducción del déficit de cupos escolares en la ciudadela y su potencial impacto en sector de movilidad.
	cantidad equivale a reducir en 1.9% las emisiones totales acumuladas al 2030. Resolver el déficit total de cupos escolares con colegios al interior de la ciudadela permitiría reducir 5,586 toneladas de $CO_{2\text{-eq}}$ por año asociadas a la reducción de viajes motorizados. Esto es el 22% de las emisiones del año base. El potencial acumulado entre 2021 y 2030 es de aproximadamente 50,274 t $CO_{2\text{-eq}}$ que representa el 15% de las emisiones acumuladas entre 2020 y 2030.
Costo-eficiencia (USD/tCO_{2}-eq):	No estimada.
Incertidumbre estimación:	Alta. El desempeño se estimó con base en información secundaria. No fue posible estimar los costos asociados a la implementación y operación de la medida.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_{2}-eq):	• NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_{2}-eq):	• Infraestructura urbana/Procesos constructivos: no estimada.
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Urbanizador, administración pública, comunidad.
Indirecto	Constructores.
Factibilidad	
Financiera	No se estimó el costo de construir un colegio o más colegios en la ciudadela.
Técnica	Alta. No se identifican barreras técnicas para la construcción y operación de colegios. Existen áreas disponibles al interior de la ciudadela para nuevos equipamientos.
Regulatoria	Alta. No se identifica la necesidad de cambios regulatorios para su implementación.
Social	Muy alta. Se esperaría una alta aceptación por parte de la población, mejora la calidad de vida. No se identifican riesgos negativos para la población por su implementación.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	- Mayores oportunidades de acceso a educación. - Menores costos de transporte para los asistentes si logran acceder caminando o en bicicleta. - Reducción de los tiempos de viaje con motivo estudiar para la población beneficiaria. - Beneficios ambientales indirectos por reducción de actividad de transporte asociada a largos desplazamientos para acceder a este servicio en la línea base. - Mayores oportunidades de empleo dentro de la ciudadela asociadas a la operación de los equipamientos. - Reducción de congestión por viajes evitados desde y hacia la ciudadela.

Tabla 103. Medida de mitigación – Creación de centros de salud y universidades en la ciudadela.

Medida 2:	Creación de centros de salud y universidades en la ciudadela.
Categorización:	Movilidad/Consumo de energía/Diseño urbano
Categorización alternativa:	Energía/Demanda de energía
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: Después de 10 años de haberse construido la ciudadela, sólo se ha desarrollado el 14% del terreno disponible para equipamientos. Existe déficit en instituciones educativas, salud, seguridad, abastecimiento de víveres, y recreación[12]. La baja oferta de oportunidades, entendidas como el acceso a trabajo, estudio, comercio formal, recreación y cultura, dentro de la ciudadela ha generado alta dependencia de Bogotá, para suplir este déficit [129]. En esta medida se analiza el impacto potencial en reducción de emisiones GEI del transporte, asociadas a solucionar el déficit de centros de salud y de universidades. No se cuenta con centros de salud en la ciudadela, aunque actualmente se encuentra en construcción un hospital de nivel III. Al interior de la ciudadela tampoco hay universidades, y solo existe una en el municipio de Soacha. La distancia entre la ciudadela y las universidades de la región es superior a 10 km. El 57% está a una distancia entre 10km-20km y el resto se ubica a más de 20km. En cuanto a los centros de salud se observa una baja oferta en un radio inferior a 10km desde la ciudadela, respecto a la cantidad de centros de salud que se observa en otras zonas de la región. En un radio de 10km desde la ciudadela, se ubica menos del 10% de la oferta de salud de la región. El 43% de la oferta de salud de la región está a una distancia entre 10km-20km y resto está a una distancia superior a 20km. Mejorar la oferta de salud y universidades en la ciudadela además de las mejoras en calidad de vida, tendría como cobeneficio reducir las emisiones de $CO_{2\text{-eq}}$ por transporte. Los viajes con motivo estudio y salud representan el 13% de los viajes totales.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_{2}-eq):	Reducción total de emisiones acumuladas hasta el 2030: 12,362 t. Se hizo un análisis del orden de magnitud del impacto que podría tener esta medida utilizando los siguientes supuestos: - solucionar el déficit de equipamientos de salud y universidades para el 50% de la población que reporta viajes con estos fines; - los viajes con motivo estudio y salud tienen un patrón de viajes similar al del promedio de la población de la ciudadela; - tener centros de salud dentro de la ciudadela permitiría reducir la distancia de cada viaje por este motivo a una distancia máxima de 5km; - tener universidades dentro de la ciudadela permitiría realizar

[12]Estos análisis fueron desarrollados por los equipos de edificaciones y movilidad para la estimación de indicadores de Ciudad Verde. Ver informe 4.

Medida 2:	Creación de centros de salud y universidades en la ciudadela.
	los viajes en modos activos (bicicleta, caminata) para cubrir una distancia máxima de 5 km. El orden de magnitud del potencial de mitigación de $CO_{2\text{-eq}}$ es de 1,374 toneladas por año. Esto equivale a reducir el 5% de las emisiones anuales generadas por transporte. Para el periodo total el potencial de mitigación es de 3.8% de las emisiones acumuladas entre el 2020-2030.
Costo-eficiencia (USD/tCO_{2}-eq):	No estimada.
Incertidumbre estimación:	Alta. El desempeño se estimó con base en información secundaria. No fue posible estimar los costos asociados a la implementación y operación de la medida.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_{2}-eq):	• NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_{2}-eq):	• Infraestructura urbana/Procesos constructivos: no estimada.
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Urbanizador, administración pública, comunidad.
Indirecto	Constructores.
Factibilidad	
Financiera	No se estimó el costo de construir los equipamientos dentro de la ciudadela.
Técnica	Alta. No se identifican barreras técnicas para la construcción y operación de centros de salud y universidades. Existen áreas disponibles al interior de la ciudadela para nuevos equipamientos.
Regulatoria	Alta. No se identifica la necesidad de cambios regulatorios para su implementación.
Social	Muy alta. Se esperaría una alta aceptación por parte de la población, mejora la calidad de vida. No se identifican riesgos negativos para la población por su implementación.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	- Mejora de la calidad de vida por acceso a los servicios básicos. - Reducción de tiempos y costos de viaje para acceder a equipamientos básicos. - Mayores oportunidades de empleo dentro de la ciudadela asociadas a la operación de los equipamientos. - Reducción de congestión por viajes evitados desde y hacia la ciudadela.

Tabla 104. Medida de mitigación - Implementación de un sistema de bicicletas.

Medida 3:	Implementación de un sistema de bicicletas.
Categorización:	Movilidad/Consumo de energía/Diseño urbano/Cambios en los patrones de comportamiento

Medida 3:	Implementación de un sistema de bicicletas.
Categorización alternativa:	Energía/Demanda de energía
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: Uno de los principales problemas percibidos por la población de Ciudad Verde es el déficit en conectividad entre la red vial del macroproyecto y las redes de transporte de Soacha y Bogotá. Ciudad Verde solo cuenta con acceso a través de la conexión que existe entre la Autopista Sur y la Avenida Terreros, desencadenando condiciones críticas de congestión para entrar o salir de la urbanización. En cuanto a la oferta de transporte público, Ciudad Verde, y en general Soacha, solo tienen acceso a dos estaciones de Transmilenio, San Mateo y Terreros, ambas a 3 Km de la ciudadela. Este déficit de alternativas entre la ciudadela y los sistemas de transporte público colectivo y masivo lo suple una oferta de buses privados y transporte informal que cumplen la función de alimentación al sistema troncal de Transmilenio, sin embargo, a un costo que para el usuario supera el del servicio de transporte público. Según la encuesta desarrollada en la ciudadela, los taxis colectivos son el modo de alimentación de mayor uso por parte de la población que utilizan tanto Transmilenio como transporte colectivo como principales modos para sus viajes obligatorios. Se propone implementar un sistema de bicicletas que pueda ser utilizado como un modo alternativo de alimentación, y para sustituir otros viajes. Para cumplir con este propósito un porcentaje de las bicicletas serían asistidas (con electricidad) y otras convencionales. Dado que el sistema de bicicletas cumpliría un rol de alimentación al sistema de transporte masivo, podría pensarse en su operación bajo una tarifa integrada. Adicionalmente la medida debería complementarse con mejoras en iluminación en la ciclo-infraestructura con la que se cuenta actualmente en la ciudadela. Éste es uno de los aspectos críticos para la población, mencionado en los grupos focales.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_{2}-eq):	Reducción total de emisiones acumuladas hasta el 2030: 8,728 t. Mediante un modelo de selección modal se estimó el potencial de viajes en bicicleta en la ciudadela. Según éste existe un potencial de realizar el 7% de los viajes en este modo. La medida se diseñó con el alcance necesario para aumentar los viajes que se hacen hoy en día en bicicleta (3.1% del total) hasta el 7%. Los viajes que se sustituyen de modos motorizados provienen de taxi colectivo, taxi individual y transporte público tradicional. Esta medida permitiría reducir 873 toneladas de $CO_{2\text{-eq}}$ en promedio al año. El potencial de mitigación acumulado equivale a reducir el 2.69% de las emisiones totales entre los años 2020 y 2030.
Costo-eficiencia (USD/tCO_{2}-eq):	15.17 USD/tCO_{2}-eq Se consideraron costos de inversión para el sistema ($1,838 usd en promedio por bicicleta) y costos anuales de operación, mantenimiento y reposición de las bicicletas ($1,011 usd por bicicleta al año) según

Medida 3:	Implementación de un sistema de bicicletas.
	información de sistemas similares en otras ciudades del mundo [130]. En los beneficios se consideraron los ahorros en combustibles por los viajes motorizados que se sustituyen.
Incertidumbre estimación:	Media. El desempeño se estimó con base en información secundaria. El costo se estimó a partir de información de sistemas similares de otras partes del mundo.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_{2}-eq):	• NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_{2}-eq):	• NA
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Gobiernos local y nacional, sistemas de transporte público, comunidad.
Indirecto	Sector privado que administre el sistema.
Factibilidad	
Financiera	Media. El costo de abatimiento es inferior a 30 usd/t CO_{2-eq}. Una barrera actual es la necesidad de fuentes alternativas de financiación del sistema de bicicletas que estaría integrado al transporte público.
Técnica	Alta. A nivel nacional se cuenta con experiencia para implementar y administrar sistemas de bicicletas.
Regulatoria	Alta. No se identifica la necesidad de cambios regulatorios para su implementación. Existen diferentes lineamientos de política pública que a nivel local y nacional buscan estimular el uso de modos de transporte activo, por ejemplo: Contribución Nacionalmente determinada de Colombia [131], Política nacional de movilidad urbana y regional [132], Política nacional de calidad del aire [133].
Social	Alta. Se esperaría una alta aceptación por parte de la población, por las mejoras en la calidad de vida que conlleve la medida. No se identifican riesgos negativos para la población por su implementación.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	- Reducción en los costos de viajes: disminución entre el 36.8% y el 68% en el costo del viaje diario para los usuarios, tomando como referencia el costo del taxi colectivo dentro del costo total del transporte diario de los encuestados, y suponiendo un costo de uso del sistema de bicicletas equivalente al de los buses del SITP. - Reducción de ruido por menor actividad en modos motorizados. - Mejora en la calidad de vida de la población. - Mejoras en salud asociadas al transporte activo. - Reducción de la congestión vial en la vía de acceso a la ciudadela.

Tabla 105. Medida de mitigación - Buses eléctricos alimentadores.

Medida 4:	Implementación de un sistema de buses alimentadores eléctricos.
Categorización:	Movilidad/Consumo de energía/Nuevas tecnologías
Categorización alternativa:	Energía/Demanda de energía
Tipo de medida:	Mitigación

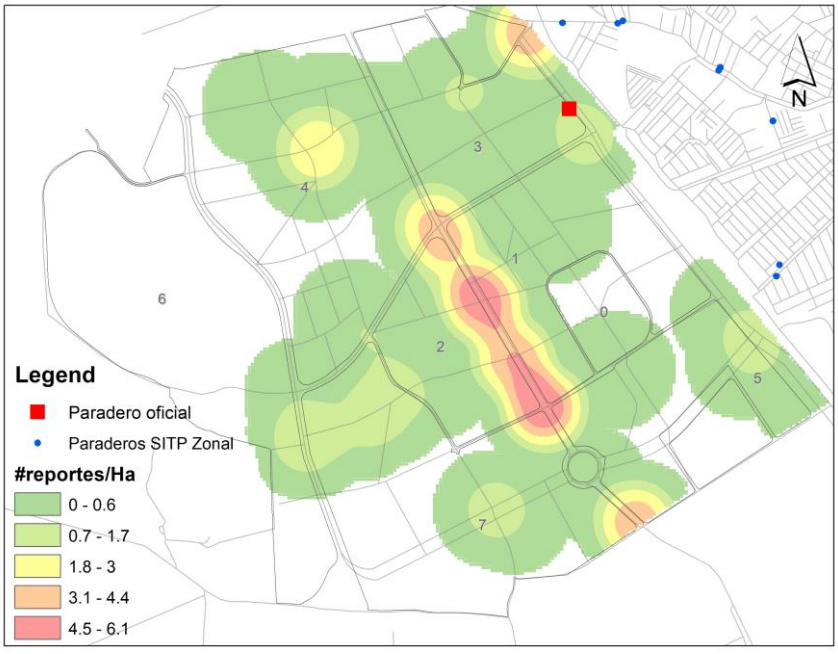
Descripción general: Uno de los principales problemas percibidos por la población de Ciudad Verde es el déficit en conectividad entre el macroproyecto y los sistemas de transporte de Soacha y Bogotá. Ciudad Verde, y en general Soacha, solo tienen acceso a dos estaciones de Transmilenio, San Mateo y Terreros, ambas a 3km de la ciudadela.

Este déficit de alternativas entre la ciudadela y los sistemas de transporte público colectivo y masivo lo suple una oferta de buses privados y transporte informal que cumplen la función de alimentación al sistema troncal de Transmilenio, sin embargo, a un costo para el usuario que supera el del servicio de transporte público.

Según la encuesta desarrollada en la ciudadela los taxis colectivos son el modo de alimentación de mayor uso por parte de la población que utilizan tanto Transmilenio como transporte colectivo como principales modos para sus viajes obligatorios.

Esta medida propone implementar un servicio de buses alimentadores y buses zonales eléctricos. Estos operarían con una tarifa integrada al sistema de transporte público.

A través de las encuestas desarrolladas con Maptionnare se identificaron los puntos al interior de la ciudadela en donde hoy en día los habitantes de Ciudad Verde toman los servicios de transporte que los llevan hacia (y desde) los sistemas de transporte de Soacha y Bogotá. Estos dan una idea de un posible trazado de las rutas para el sistema que se propone.



Gráfica 1. Ubicación de paraderos del SITP y ubicación de puntos geográficos en donde la población toma los servicios de transporte.

Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA

Medida 4:	Implementación de un sistema de buses alimentadores eléctricos.
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_{2}-eq):	Reducción total de emisiones acumuladas hasta el 2030: 34,495 t. Para evaluar el potencial de mitigación de la medida, se diseñó un escenario en el que el 50% de los viajes que se hacen en buses convencionales pasan a hacerse en buses eléctricos. Con el alcance propuesto alrededor de 17,000 viajes por día en buses convencionales serían sustituidos por viajes en buses eléctricos. En el análisis de emisiones GEI se consideró el incremento asociado a la generación de electricidad para la operación de la nueva flota de buses. Con esta medida se evitarían 3,833 t CO_{2}-eq en promedio al año.
Costo-eficiencia (USD/tCO_{2}-eq):	71.72 USD/tCO_{2}-eq La medida tiene un costo neto de 2.4 millones de dólares. En el análisis de costos se consideraron los relacionados con compra de buses eléctricos e infraestructura de carga. También se tuvo en cuenta el ahorro asociado a la reducción del consumo de combustibles fósiles.
Incertidumbre estimación:	Media. El desempeño se estimó con base en información secundaria. El costo se estimó a partir de información de sistemas similares de otras ciudades de Colombia.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_{2}-eq):	• NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_{2}-eq):	3.57 tCO_{2}-eq por generación de electricidad para los buses.
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Gobiernos local y nacional, entes gestores y operadores de sistemas de transporte público, comunidad.
Indirecto	Sector privado involucrado en las diferentes partes de la cadena del transporte eléctrico.
Factibilidad	
Financiera	Baja. El costo de abatimiento es superior a 30 usd/t CO_{2}-eq. Una barrera actual es la necesidad de fuentes alternativas de financiación del sistema de transporte público.
Técnica	Alta. A nivel nacional se cuenta con experiencia para implementar y administrar sistemas de buses eléctricos.
Regulatoria	Alta. No se identifica la necesidad de cambios regulatorios para su implementación. Existen diferentes lineamientos de política pública que a nivel local y nacional promueven el uso de buses eléctricos para transporte público: Contribución Nacionalmente determinada de Colombia [131], Política nacional de movilidad urbana y regional [132], Política nacional de calidad del aire [133], Ley 1964 de 2019 que contiene metas de

Medida 4:	Implementación de un sistema de buses alimentadores eléctricos.
	penetración del transporte eléctrico, la Ley 1955 de 2018 que aprueba el plan nacional de desarrollo 2018-2022, y éste contempla metas en flota eléctrica, la Política de Crecimiento Verde y el Plan Energético Nacional de Colombia.
Social	Alta. Se esperaría una alta aceptación por parte de la población, por las mejoras en la calidad de vida que conlleve la medida. No se identifican riesgos negativos para la población por su implementación.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	- Reducción en ruido por sustitución de buses de combustión interna por flota eléctrica. Este beneficio es para la ciudadela, y en general para todos los usuarios y conductores de los buses eléctricos. También sería un beneficio para los que viven o permanecen en las zonas de circulación de los buses. - Reducción de 2,900 kg de $PM_{2.5}$ durante el tiempo de evaluación de la medida. Esto significa mejoras en la calidad del aire de Soacha y Bogotá. - Reducción de la concentración de $PM_{2.5}$ al interior de la cabina de los buses, al pasar de flota diésel a flota eléctrica. Los principales beneficiarios son las personas que realizan los viajes más largos. - Reducción de los costos diarios del transporte para los usuarios al pasar de opciones informales a un sistema con tarifa integrada.

Tabla 106. Medida de mitigación - Buses troncales eléctricos.

Medida 5:	Sustitución de buses troncales de combustión interna por flota eléctrica.
Categorización:	Movilidad/Consumo de energía/Nuevas tecnologías
Categorización alternativa:	Energía/Demanda de energía
Tipo de medida:	Mitigación

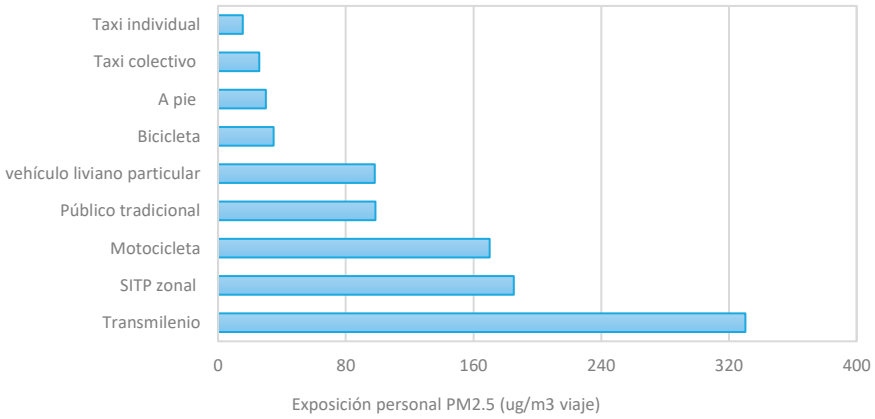
Descripción general: El sistema de transporte masivo es el modo predominante para viajar entre los habitantes de la ciudadela. El 42.8% de los viajes diarios se hacen en este modo.

Para los habitantes de CV el tiempo promedio de viaje en Transmilenio es de 1.9 horas, siendo el modo con el segundo tiempo promedio más alto después del SITP (2 horas por viaje).

Por otro lado, según como ha sido documentado en estudio locales, los niveles de concentración de material particulado fino al interior de la cabina de los buses de Transmilenio, puede llegar a ser muy superior respecto a los niveles en otros modos de transporte, y excede en varias veces los niveles recomendados por la Organización Mundial de la Salud. Para este análisis nos basamos en información reciente sobre niveles de exposición personal en diferentes medios de transporte para Bogotá [134], [135].

Altos tiempos de viaje y elevados niveles de concentración de $PM_{2.5}$ al interior de la cabina de los buses, implica que la población de CV que utiliza Transmilenio como modo predominante de transporte es la que sufre de los mayores niveles de exposición personal a la contaminación, respecto a los otros modos de transporte utilizados por los habitantes de la ciudadela (ver Gráfica 2).

Medida 5:	Sustitución de buses troncales de combustión interna por flota eléctrica.



Gráfica 2. Niveles de exposición personal a $PM_{2.5}$ estimados para diferentes modos de transporte según tiempos de viaje y niveles de concentración promedio de $PM_{2.5}$ por modo.

En esta medida se propone sustituir buses articulados de Transmilenio que operan a diésel por buses eléctricos. Además de los beneficios en reducción de la exposición personal de los usuarios del sistema, la medida tiene cobeneficios en reducción de emisiones GEI.

Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_{2}-eq):	Reducción total de emisiones acumuladas hasta el 2030: 80,460 t. La medida abarca 208 buses articulados de Transmilenio con estándares de emisión Euro II-IV. La medida tiene impactos que van más allá de los viajes realizados por los habitantes de la ciudadela, ya que estos buses también serían utilizados por otros usuarios del sistema de transporte masivo. En el análisis de emisiones se consideró el incremento asociado a la generación de electricidad para la operación de la nueva flota de buses. Ciudad Verde: el potencial de mitigación acumulado al 2030 asociado a los viajes de la ciudadela que se hacen en Transmilenio es de 80,460 toneladas de CO_{2}. Bogotá-Región: el potencial de mitigación teniendo en cuenta todos los viajes que se hacen en la flota sustituida es de 221,711 t $CO_{2\text{-eq}}$ entre 2022 y 2030.
Costo-eficiencia (USD/tCO_{2}-eq):	17.22 USD/tCO_{2}-eq Esta medida tiene un costo neto de 3.8 millones de dólares. En el análisis de costos se consideraron los relacionados con compra de buses eléctricos e infraestructura de carga. Se tuvo en cuenta el ahorro por

Medida 5:	Sustitución de buses troncales de combustión interna por flota eléctrica.
	reducir el consumo de combustibles fósiles en el transporte público. La costo-eficiencia de la medida es de 17.2 usd/t $CO_{2\text{-eq}}$ considerando todo el potencial de mitigación para Bogotá-Región.
Incertidumbre estimación:	Media. El desempeño se estimó con base en información secundaria. El costo se estimó a partir de información de sistemas similares en Colombia.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	• NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	13.44 tCO_2-eq por generación de electricidad para los buses.
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Gobiernos local y nacional, entes gestores y operadores de sistemas de transporte público, comunidad.
Indirecto	Sector privado involucrado en las diferentes partes de la cadena del transporte eléctrico.
Factibilidad	
Financiera	Medio. El costo de abatimiento es inferior a 30 usd/t $CO_{2\text{-eq}}$. Una barrera actual es la necesidad de fuentes alternativas de financiación del sistema de transporte público.
Técnica	Alta. A nivel nacional se cuenta con experiencia para implementar y administrar sistemas de buses eléctricos.
Regulatoria	Alta. No se identifica la necesidad de cambios regulatorios para su implementación. Existen diferentes lineamientos de política pública que a nivel local y nacional promueven el uso de buses eléctricos para transporte público: Contribución Nacionalmente determinada de Colombia [131], Política nacional de movilidad urbana y regional [132], Política nacional de calidad del aire [133], Ley 1964 de 2019 que contiene metas de penetración del transporte eléctrico, la Ley 1955 de 2018 que aprueba el plan nacional de desarrollo 2018-2022, y éste contempla metas en flota eléctrica, la Política de Crecimiento Verde y el Plan Energético Nacional de Colombia.
Social	Alta. Se esperaría una alta aceptación por parte de la población, por las mejoras en la calidad de vida que conlleve la medida. No se identifican riesgos negativos para la población por su implementación.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	- Reducción en ruido por sustitución de buses de combustión interna. Este beneficio es para la ciudadela, y en general para todos los usuarios y conductores de los buses eléctricos. También sería un beneficio para los que viven o permanecen en las zonas de circulación de los buses. - Reducción de 26,300 kg de $PM_{2.5}$ durante el tiempo de evaluación de la medida. Esto significa mejoras en calidad del aire de Soacha y Bogotá. - Reducción de la concentración de $PM_{2.5}$ al interior de la cabina de los buses, al pasar de flota diésel a flota eléctrica. Los principales beneficiarios son las personas que realizan los

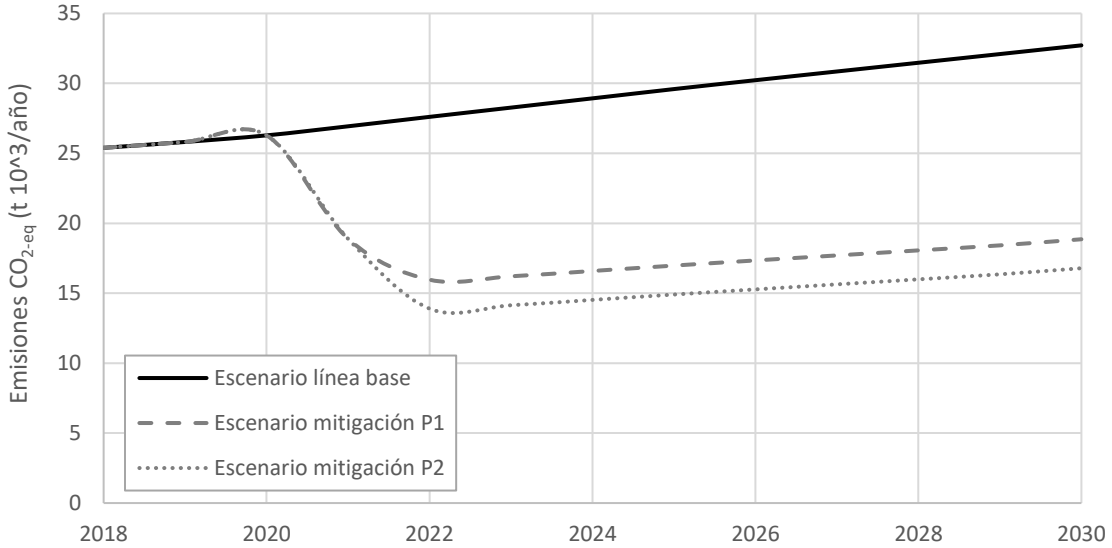
Medida 5:	Sustitución de buses troncales de combustión interna por flota eléctrica.
	viajes más largos. - Reducción de los costos diarios del transporte para los usuarios al pasar de opciones informales a un sistema con tarifa integrada.

- **Escenarios de mitigación de emisiones GEI**

Para CV se propusieron cinco medidas de mitigación de emisiones GEI: 1) Reducción del déficit de cupos escolares en la ciudadela y su potencial impacto en emisiones GEI del sector de movilidad 2) Aumento en la oferta de centros de salud y universidades y su potencial impacto en emisiones GEI del sector de movilidad; 3) Implementación de un sistema de bicicletas; 4) Implementación de un sistema de buses alimentadores eléctricos; y 5) Sustitución de buses troncales de combustión interna por flota eléctrica. A partir de la evaluación del potencial de mitigación de emisiones GEI de las medidas se estimó el impacto de implementarlas simultáneamente.

Debido a que para las medidas 1 y 2 no fue posible desarrollar el análisis de costo-eficiencia, sino únicamente una aproximación al potencial de mitigación de emisiones GEI, se presentan dos resultados: i) considerando únicamente las medidas para las que fue posible desarrollar el análisis completo, medidas 3-5: ii) considerando las 5 medidas de mitigación.

El paquete conformado por las medidas 3-5 permitiría reducir 123,683 toneladas de $CO_{2\text{-eq}}$ al 2030. El potencial de reducción representa el 38% de las emisiones acumuladas entre 2020 y 2030 en la línea base de emisiones. El potencial de mitigación de implementar las 5 medidas es de 142,309 toneladas de $CO_{2\text{-eq}}$ al 2030, lo que equivale a mitigar el 43.7% de las emisiones respecto a la línea base (ver Figura 93, Tabla 107 y Tabla 108).



Escenario de mitigación P1: incluye medidas 3-5; Escenario de mitigación P2: incluye medidas 1-5.
Figura 93. Escenario de línea base y de mitigación de emisiones GEI en Ciudad Verde.

- **Análisis de resultados**

Tabla 107. Resumen de resultados de las medidas de mitigación de emisiones GEI.

Medida		Costo-eficiencia (usd/t $CO_{2\text{-eq}}$)	Potencial de mitigación 2020-2030 Miles toneladas $CO_{2\text{-eq}}$	Reducción relativa respecto a la línea base 2020-2030
1	Reducción del déficit de cupos escolares en la ciudadela y su potencial impacto en sector de movilidad.	n.d	Un colegio: 6.26 Resolver todo el déficit: 50.27*	Un colegio: 1.9% Resolver todo el déficit: 15%
2	Aumento en la oferta de centros de salud y universidades y su potencial impacto en sector de movilidad.	n.d	12.36	3.8%
3	Implementación de un sistema de bicicletas.	15.17	8.73	2.7%
4	Implementación de un sistema de buses alimentadores eléctricos.	71.72	34.50	10.6%
5	Sustitución de buses troncales de combustión interna por flota eléctrica.	17.22	Potencial Ciudad Verde: 80.4 Potencial Bogotá-Región: 221.7	Potencial Ciudad Verde: 24.7% Potencial Bogotá-Región: n.a

n.d.: no disponible. No fue posible estimar el costo asociado a estas medidas. n.a.: no aplica. Las emisiones de la línea base únicamente se estimaron para la ciudadela no para Bogotá-Región. *En los análisis de mitigación de Ciudad Verde se consideró la reducción de emisiones GEI asociada a la construcción de un colegio. Para la medida de buses troncales eléctricos se sumó el potencial de los viajes de la población de Ciudad Verde, y no el potencial para toda la región.

Tabla 108. Resumen de resultados los paquetes de mitigación de emisiones GEI.

Paquete	Potencial de mitigación 2020-2030 (miles toneladas $CO_{2\text{-eq}}$)	Reducción relativa respecto a línea base 2020-2030 (porcentaje)
Medidas 3-5	123.68	38%
Medidas 1-5	142.31	43.7%

De los resultados de las medidas en movilidad sostenible analizadas para Ciudad Verde se resaltan los siguientes mensajes:

- Resolver los problemas de accesibilidad de la población a los servicios básicos, a través de la creación de centros de salud y educación dentro de la ciudadela, podría tener cobeneficios en reducción de emisiones GEI entre 5.7% y 18.8% de las emisiones acumuladas en la línea base durante el periodo 2020-2030.

- Reducir la exposición personal de población a los altos niveles de contaminación por material particulado asociados a los buses articulados diésel en largos trayectos, tiene como cobeneficio reducir las emisiones netas de GEI en 24.7%, en comparación con las emisiones por transporte de línea base.

- Mejorar la oferta de servicios para conectar la ciudadela con los servicios de transporte público de Bogotá y Soacha conlleva como cobeneficio una reducción del 13.3% de las emisiones GEI de la línea base entre 2020 y 2030.

- De las medidas que se evaluaron en términos de costo-eficiencia, dos tienen costos inferiores a 20 usd/t $CO_{2\text{-eq}}$ y una de 71.7 usd/t $CO_{2\text{-eq}}$. Sin embargo, dados los múltiples beneficios identificados para las medidas que van más allá de la reducción de emisiones GEI, sería relevante incluirlos como parta de la evaluación al momento de su priorización.

6.3.6. Edificaciones e infraestructura

Las medidas de mitigación para este sector se dividen en dos: las que se centran en las emisiones incorporadas y las que se centran en la operación.

- **Mitigación de emisiones incorporadas**

Las medidas de mitigación de las emisiones incorporadas (o embebidas) son aquellas que al ser aplicadas permiten reducciones en las emisiones de GEI asociadas a las primeras etapas del ciclo de vida.

Existen diversas estrategias que permiten reducir las emisiones de GEI. La literatura clasifica estas estrategias dentro de cinco grandes grupos: (1) el reemplazo de materiales tradicionales por materiales con menores emisiones asociadas; (2) la reducción de las cantidades de materiales utilizadas en la construcción; (3) la reutilización y reciclaje de materiales; (4) el abastecimiento de materiales a nivel local; y (5) la optimización de procesos constructivos [136]. Con base en lo anterior, se destacan las siguientes acciones: el reemplazo de materiales tradicionales por materiales cementantes suplementarios o por madera, optimización de los recursos a partir del diseño, la reutilización de residuos de concreto en rellenos, la utilización de materiales locales y la optimización de procesos constructivos (enfocándose en operaciones tales como el movimiento de tierra y elevaciones, entre otros).

En línea con lo anterior, es importante tener en cuenta las recomendaciones emitidas por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. En este sentido, el gobierno colombiano ha elaborado una serie de fichas en las que se detallan criterios ambientales para el diseño y construcción de la vivienda urbana [137]. Uno de los ejes temáticos tiene en cuenta la materialidad y en este capítulo se especifican estrategias que van dentro de los lineamientos internacionales. Se incluyen estrategias enfocadas a racionalizar el uso de materiales, sustituir materiales y procesos de alto impacto y el manejo del impacto ambiental.

Por otra parte, con respecto a un componente de la infraestructura urbana, la malla vial, los avances tecnológicos presentan un interesante paquete de medidas enfocadas hacia los materiales y procesos constructivos que promueven la sostenibilidad. Para este tipo de estructuras se ha extendido, tanto a nivel internacional como a nivel nacional, la utilización de material reciclado (RAP y GCR) y técnicas de construcción más acordes con la sostenibilidad (WMA) [138]–[140].

En el presente estudio se evalúan tres medidas de mitigación: dos para las edificaciones y una para la infraestructura urbana.

- **Edificaciones**

Con respecto a las edificaciones se contemplan dos medidas de mitigación: una que consiste en reemplazar parcialmente el cemento utilizado en la fabricación del concreto de losas y cubiertas por cenizas volantes y otro que contempla el reemplazo del ladrillo utilizado en muros internos no estructurales por bloques de tierra comprimida (BTC o CSEB). Ambas medidas de mitigación se implementarán a partir de 2021. Aunque la evaluación de medidas se restringe a estas dos, es importante destacar que actualmente en el mercado nacional se encuentran materiales con menores emisiones

asociadas. Particularmente, se destacan dos materiales cementantes sustitutos (MCS) reconocidos a nivel mundial: las escorias de alto horno y las arcillas activadas térmicamente. La escoria de alto horno desafortunadamente tiene una limitada disponibilidad en el país [141] y las arcillas activadas térmicamente recientemente comenzaron a ser comercializadas por un proveedor [142].

Tabla 109. Reemplazo del cemento por MCS: cenizas volantes

Medida 1:	Remplazo del cemento por MCS: cenizas volantes
Categorización:	Infraestructura urbana / Procesos constructivos / Materiales
Categorización alternativa:	IPPU / IPPU
Tipo de medida:	Mitigación

Descripción general:

Se propone reemplazar el 25% del cemento portland utilizado en la construcción de las losas de entrepiso y cubierta por un material cementante sustituto (MCS): las cenizas volantes.

Esta medida se encuentra especificada dentro del documento guía sobre materiales en la certificación EDGE (Excellence in Design for Greater Efficiencies). En esta certificación se menciona un reemplazo del 30% y los resultados presentados por el software cuantifican únicamente la energía incorporada (MJ/ton). Utilizando el mismo espesor de placa entre la línea base y la medida de mitigación, la reducción en la energía incorporada que presenta el software para la edificación es del 5.59%. En esta certificación, el reemplazo del cemento por cenizas volantes es una de las medidas más recomendadas para mejorar la sostenibilidad [143].

Las cenizas volantes (CV) es un material volcánico de origen antropogénico [144], y un subproducto resultante de la combustión del carbón. Las cenizas quedan capturadas en la parte superior de la caldera y son obtenidas principalmente de las centrales eléctricas de carbón [145]. Tal y como se menciona anteriormente, las CV son materiales cementantes. Un MCS es un material inorgánico que contribuye a las propiedades de una mezcla cementante a través de actividad hidráulica o puzolánica [146].

Existe una diversidad de factores que afectan las propiedades físicas y químicas de las cenizas, tales como el tipo de carbón, el tipo de caldera y las condiciones operativas y de postcombustión, entre otros [147]. En el concreto generalmente se reemplaza entre el 15% y el 30% de la masa del material cementante, aunque mayores reemplazos (30%-50%) son utilizados para controlar el aumento de temperatura en algunas estructuras masivas [144].

Existen tres clases de cenizas volantes: la N, la F y la C. De estas, la clase F tiene propiedades puzolánicas y la clase C, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene algunas propiedades cementosas [148].
En la Tabla 110 se sintetizan algunos de los efectos generados por la utilización de cenizas volantes en el comportamiento del concreto.

Tabla 110. Efectos de la ceniza volante sobre el concreto. Elaborado por [144]

Propiedades del concreto		Impactos de la ceniza volante	Ref.
Mecánicas	Resistencia a la compresión (f_C)	Usualmente reduce la resistencia a la compresión a temprana edad.	[149], [150]
	Resistencia a flexión (f_{bt})	Concretos con reemplazos de CV inferiores al 50% demostraron mayor resistencia a flexión. El valor de f_{bt} disminuye un poco al incrementar el contenido de CV con reemplazos entre el 40 y 80%.	[150], [151]
	Resistencia a tensión por compresión (f_t)	Concretos con reemplazos de CV de 50% mostraron una mejoría del 20% en (f_t). Reemplazos del 70 % mostraron peor desempeño que el concreto sin CV.	[151]

Medida 1:	Remplazo del cemento por MCS: cenizas volantes

Durabilidad	Carbonatación	Concretos con reemplazos de CV son más susceptibles a la carbonatación. Mayores reemplazos generan mayor susceptibilidad.	[152]

Aunque en Colombia se utilizan actualmente cenizas volantes dentro de la producción del cemento el porcentaje de reemplazo no es tan alto [153].

Algunos estudios que se han realizado en el país evalúan el comportamiento de concretos con adiciones de cenizas volantes; dentro de estos se destaca la tesis doctoral '*Empleo de ceniza volante colombiana como material cementicio suplementario y sus efectos sobre la fijación de cloruros en concretos'*. Dicho estudio evalúa las cenizas volantes provenientes de tres termoeléctricas del país: TermoPaipa, TermoSochagota y TermoTasajero. El autor concluye que todas las cenizas entran dentro de la clasificación 'F' y que las que mejores propiedades tienen son las procedentes de TermoSochagota ya que cuentan con un bajo contenido de humedad y el menor contenido de inquemados [154].

La disponibilidad del material cementante sustituto está sujeto a su disponibilidad futura ya que a nivel mundial se está apostando por fuentes energéticas diferentes a las termoeléctricas.

La medida se aplica para todas las edificaciones independiente de su sistema constructivo, y la sustitución propuesta se refiere únicamente a las losas de entrepiso y de cubierta. La medida se aplica para la totalidad de las viviendas nuevas construidas a partir del 2021 en Ciudad Verde. Se incluyen 441, 098 m^2 construidos.

Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	4, 340.12
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	$ 28.48
Incertidumbre estimación:	3 (Alta) El desempeño ambiental se cuantifica a partir de la base de datos ICE y el factor emisión del cemento a nivel local [39], [155]. Los costos se cuantificaron de manera indirecta ya que en el mercado nacional no se comercializa habitualmente el cemento Portland ordinario (con proporción Clinker-cemento de 95%). La mayoría de los procesos de emisión son considerados a través de los modelos empleados.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Constructoras, cementeras y concreteras
Indirecto	Administración pública y usuarios finales
Factibilidad	

Medida 1:	Remplazo del cemento por MCS: cenizas volantes
Financiera	2 (Medio) El precio de venta de las cenizas volantes se obtiene a partir del contacto directo con proveedores y su valor es inferior al del cemento Portland. Ahora bien, la viabilidad financiera no es alta ya que dentro de la práctica actual de la producción de cemento ya se utilizan cantidades importantes de otros aditivos [153].
Técnica	2 (Media) Los reemplazos de cenizas volantes propuestos en esta medida se encuentran dentro de los rangos normales de la práctica usual a nivel internacional [144]. En la práctica común en el país, el porcentaje de reemplazo de CV es limitado, aunque se tiene conocimiento de la realización de algunos proyectos piloto que llegan al 25%. Por otra parte, independientemente de las empresas concreteras, existen empresas especializadas en la utilización de las cenizas volantes en el país. Se cuenta con experiencia previa en infraestructura y en desarrollo de proyectos de vivienda en el país [156], [157].
Regulatoria	3 (Alto) Existen elementos en las leyes y regulaciones vigentes que permiten su implementación. En efecto, la normativa colombiana cuenta con Normas Técnicas tales como la NTC 6312:2019 (especificaciones para mezclas de materiales cementantes suplementarios) y la NTC 3493:2019 (cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento portland) [158], [159].
Social	2 (Social) Si bien la medida no afecta la calidad de vida ni genera riesgos para la población, todavía existe ciertos prejuicios por parte de la industria en torno a la utilización de mayores cantidades de MCS.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	Calidad del Agua – Positivo Otro beneficio que debe ser tenido en cuenta es que la utilización de cenizas volantes disminuye el uso de agua durante la construcción del concreto [160] por lo que tiene un impacto positivo en la calidad del agua.
	Confort – Neutro Se esperaría que debido a la reducción del factor de transmisividad térmica existan beneficios en torno al confort. Sin embargo, las modelaciones realizadas con uno y otro material reflejan cambios imperceptibles en la temperatura ya que el material reemplazado no se realiza en la envolvente de la edificación.

Tabla 111. Reemplazo de ladrillos por bloques ecológicos

Medida 2:	Reemplazo de ladrillos por bloques ecológicos
Categorización:	Infraestructura urbana / Procesos constructivos / Materiales
Categorización alternativa:	IPPU / IPPU
Tipo de medida:	Mitigación

Descripción general:

La medida consiste en la utilización de bloques de tierra compactada estabilizada con cemento (BTC o *CSEB*) en los muros interiores no estructurales, en reemplazo de los ladrillos convencionales de arcilla cocida.

Los BTC son materiales de construcción ambientalmente amigables, que presentan diversas ventajas frente a los ladrillos tradicionales. Estos bloques ecológicos se elaboran con una mezcla de tierra con cemento que actúa como material estabilizante (aunque se pueden utilizar también otros productos como la cal, la mezcla de cal y cemento o las arcillas). La mezcla formada es compactada y moldeada utilizando una prensa mecánica y no se requiere emplear hornos que, tal como ocurre con el ladrillo convencional, demandan para su operación un elevado consumo energético. El proceso de fabricación de los BTC conlleva el vertimiento de tierra húmeda en una prensa de acero y la compresión con fuerza manual o motriz para formar bloques de tierra compactada. Posterior al proceso de estabilización con cemento se requiere un período de curado de cuatro semanas. Por lo general, la tierra se estabiliza con cemento en una proporción que generalmente fluctúa entre el 5% y 8% de la masa del bloque [161].

Existen diversas ventajas de BTC en la construcción: este tipo de bloque permite demandar materiales locales que no requieran transporte desde sitios distantes y por lo tanto conllevan el ahorro de combustible, tiempo y dinero. Además, no requieren el consumo de combustibles fósiles en su proceso de manufactura, es una producción eficiente energética y amigable ambientalmente. De acuerdo con Auroville Earth Institute, el consumo de energía puede ser entre 5 y 15 veces menor al de los ladrillos cocidos, y las emisiones de GEI pueden ser entre 2.4 y 7.8 veces menores que los ladrillos convencionales. Otros autores como Davis y Maini (2016) plantean que la huella de carbono, medida en emisiones de kg de CO_2/m^3 del BTC es de aproximadamente el 12.5 menor que el de los ladrillos cocidos de arcilla cuando el BTC es producido con tierra conseguida en la obra. Así mismo, y dependiendo de la disponibilidad de suelos adecuados utilizados, puede ser menos costosa. Este tipo de bloques tienen buenas propiedades de aislamiento térmico y permite la absorción de la humedad atmosférica creando ambientes saludables para los ocupantes dentro de las viviendas. Así mismo, este material es un buen aislante acústico y resistente al fuego [162].

La medida se aplica para muros internos no estructurales de las viviendas en sistema industrializado construidas a partir del 2021 en Ciudad Verde. Se incluyen 168, 446 m^2 construidos.

Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	924.29
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	$ 19.21
Incertidumbre estimación:	3 (Alta) El desempeño ambiental y los costos de la medida se estiman a partir de datos reportados nacional e internacionalmente [39], [162], [163]. La mayoría de los procesos de emisión y captura de carbono son

Medida 2:	Reemplazo de ladrillos por bloques ecológicos
	considerados a través de los modelos empleados, aunque se priorizan las emisiones asociadas a la etapa de producción.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Constructoras y ladrilleras
Indirecto	Administración pública y usuarios finales
Factibilidad	
Financiera	2 (Media) El costo por tonelada reducida se encuentra entre 5 y 30 USD. Se tuvo en cuenta los costos locales de los materiales a sustituir y se encontraron valores de referencia
Técnica	3 (Alta) Se cuenta con experiencia previa en el país para su construcción y mantenimiento. La producción de los BTC no requiere de maquinaria muy especializada o de avances técnicos particulares y además se tiene conocimiento del desarrollo de algunas iniciativas [164].
Regulatoria	3 (Alta) Existen elementos en las leyes y regulaciones vigentes que permiten su implementación. En efecto, el país cuenta con una Norma Técnica Colombiana NTC 5324:2004 (Bloques de suelo cemento para muros y divisiones. Definiciones. Especificaciones. Métodos de ensayo, Condiciones de entrega) que facilita su estandarización e implementación [165].
Social	2 (Social) Aunque esta medida no afecta la calidad de vida ni presenta riesgos para la población, todavía existe un escaso conocimiento general de esta tecnología y una incipiente conciencia respecto a sus bondades [161]
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	Empleo – Positivo Otro beneficio que debe ser tenido en cuenta es que esta medida requiere una importante cantidad de mano de obra no calificada, lo que no solamente facilita la adopción de esta tecnología, sino que promueve la generación de empleo.

En la Figura 94 se presenta la curva de emisiones para el caso base y los escenarios de aplicación de cada una de las medidas y en la Figura 95 se presenta la curva de abatimiento que permite cuantificar las diversas acciones que contribuyen a reducir las emisiones generadas y los costos asociados a estos.

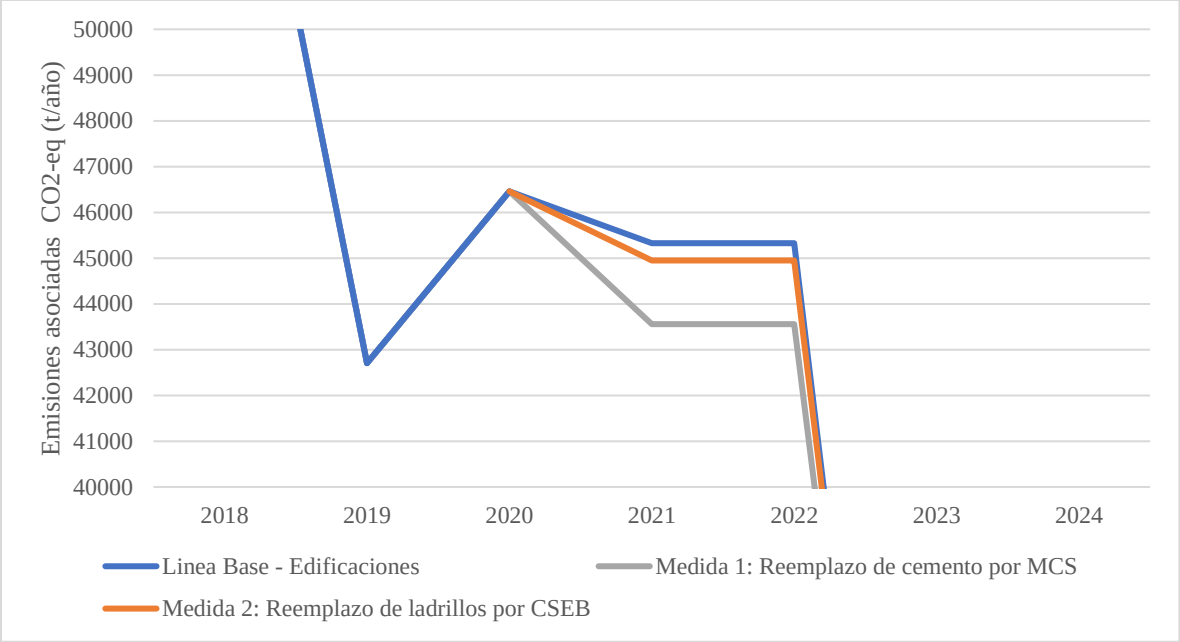


Figura 94. Curvas de emisiones para el caso de estudio según la aplicación de la medida 1 y 2

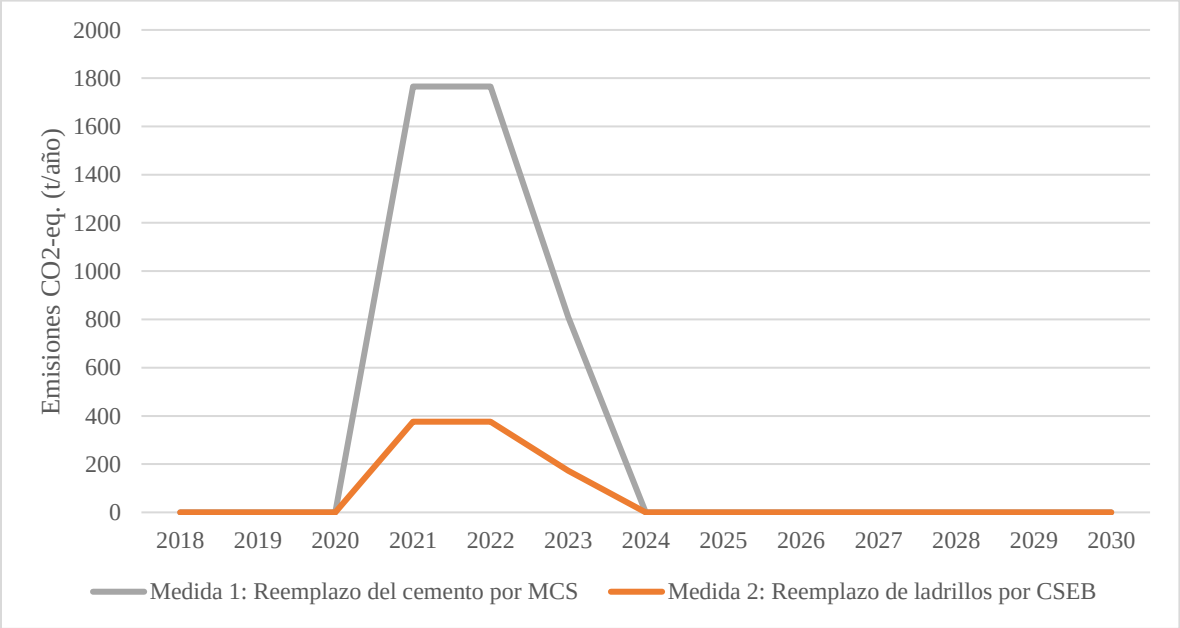


Figura 95. Curva de abatimiento de emisiones para la medida 1 y 2

- **Infraestructura urbana**

Con respecto a la infraestructura urbana se contempla una medida de mitigación que implica la utilización de una mezcla asfáltica sostenible a partir de la incorporación de un porcentaje de RAP en el pavimento asfáltico flexible y su elaboración con una tecnología de mezcla asfáltica tibia.

Tabla 112. Mezcla asfáltica sostenible

Medida 3:	Mezcla asfáltica sostenible
Categorización:	Infraestructura urbana / Procesos constructivos / Materiales

Medida 3:	Mezcla asfáltica sostenible
Categorización alternativa:	IPPU / IPPU
Tipo de medida:	Mitigación

Descripción general:

La medida corresponde al uso de una mezcla asfáltica con un reemplazo del 25% de RAP (pavimento asfáltico reciclado) mediante la implementación de tecnología de mezcla asfáltica tibia (WMA). Se propone que esta medida se aplique tanto en la construcción de vías nuevas como en la rehabilitación de vías existentes y su implementación comienza a partir del 2021.

La mezcla asfáltica sostenible combina dos tecnologías que generan beneficios ambientales y sociales comprobados: por un lado, el pavimento asfáltico reciclado y por el otro la mezcla asfáltica tibia.

El pavimento asfáltico reciclado (o RAP, por sus siglas en inglés) designa a los materiales de pavimento removidos y/o procesados que contienen asfalto y agregados [166]. Al ser molido, el RAP se vuelve un agregado de buena gradación, recubierto con cemento asfaltico. La reutilización y reciclaje de estos materiales genera importantes beneficios ambientales (ahorros energéticos y en emisiones de GEI) y económicos [167]. Los principales beneficios de utilizar RAP en la mezcla asfáltica están en que su uso no solamente permite ahorrar en la utilización de agregados vírgenes, sino que además disminuye la demanda del ligante asfáltico que es más costoso y genera un mayor impacto ambiental. Aunque el RAP puede ser utilizado en las capas de base o subbase, los mayores beneficios económicos y ambientales se consiguen cuando se emplea en las capas superficiales [168], [169].

Por otra parte, la mezcla asfáltica tibia (o WMA, por sus siglas en inglés) corresponde al empleo de tecnologías y/o aditivos que reducen las temperaturas de producción del asfalto entre 20ºC y 40ºC respecto a la práctica tradicional (mezclas calientes) [170]. La WMA, aunque requiere el uso de aditivos, permite disminuir las emisiones de GEI y reducir el consumo energético [171].

Tanto el empleo del RAP como la tecnología de WMA permiten lograr beneficios ambientales que mejoran la sostenibilidad de la infraestructura urbana. No obstante, la aplicación de estas tecnologías ha presentado diferentes inconvenientes en circunstancias específicas ya que pueden eventualmente presentar consecuencias negativas en el desempeño del pavimento asfáltico. En efecto, por un lado, implementar grandes cantidades de asfalto reciclado (y envejecido) puede reducir la eficiencia de la mezcla [172] aunque generalmente se utilizan rejuvenecedores para superar esta limitación [173]. Por otro lado, una disminución en la temperatura de producción puede generar insuficiencias en el aglutinamiento del ligante asfáltico y los agregados, lo que a su vez puede provocar afectaciones en la resistencia al ahuellamiento y en la susceptibilidad al daño por humedad [174].

Ahora bien, cuando se combinan ambas tecnologías se pueden compensar las limitaciones de cada procedimiento cuando es empleado sin el otro simultáneamente; algunos aditivos requeridos por la WMA ayudan a mejorar propiedades de la mezcla que se afectan con altos niveles de RAP y la utilización de RAP mejora el desempeño que tienen las mezclas realizadas mediante WMA frente al ahuellamiento [139]. El National Center for Asphalt Technology (NCAT) promueve en EEUU decididamente la combinación de RAP con WMA y menciona que debería ser empleada siempre que sea posible [175].

En la Figura 96 esquematizan de manera sintética las ventajas y desventajas de las tecnologías mencionadas previamente cuando se aplican por separado y cuando se utilizan en combinación.

Medida 3:	Mezcla asfáltica sostenible

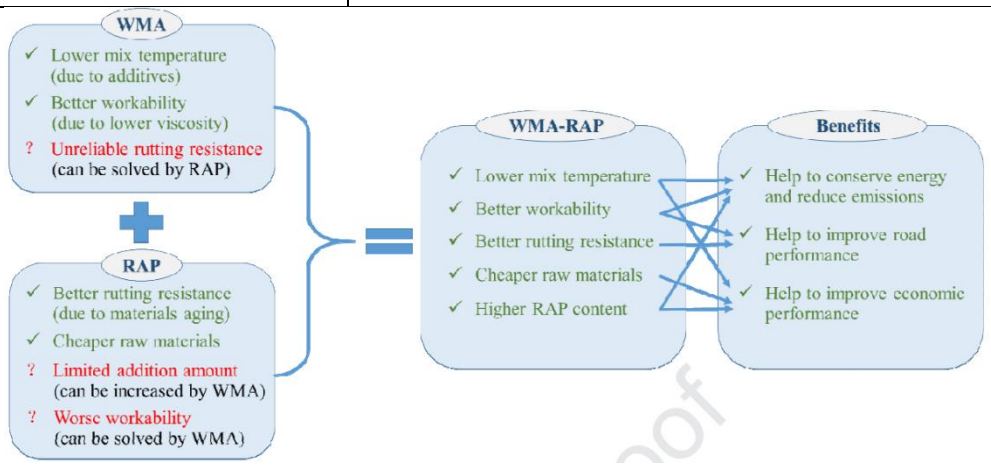


Figura 96.Esquema sintético de la combinación del WMA y RAP. Tomado de [139].

Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	1, 381.00
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	-$ 50.76
Incertidumbre estimación:	3 (Alta) El desempeño y los costos se cuantificaron con información secundaria proveniente de casos de estudios realizados en otros países [176], [177]. La mayoría de los procesos de emisión y captura de carbono son considerados a través de los modelos empleados.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Constructores de infraestructura vial y entidades gubernamentales distritales contratantes.
Indirecto	Desarrollador del proyecto, administración pública y comunidad
Factibilidad	
Financiera	3 (Media) Costo por tonelada reducida menor al valor del impuesto al carbono en Colombia (5 USD). Dentro del análisis financiero se incluye el costo de producción de la mezcla asfáltica sostenible. El RAP es más barato que la mezcla tradicional pero la WMA requiere del uso de aditivos que

Medida 3:	Mezcla asfáltica sostenible
	elevan ligeramente el precio. No obstante, es importante mencionar que la tecnología WMA trae importantes ahorros en costos relacionados con el consumo de combustibles. Una ventaja económica adicional que no se incluyó en el análisis de costo-eficiencia de la WMA es que reduce costos de los usuarios al permitir disminuir los tiempos requeridos para poner en circulación las vías recién intervenidas [178].
Técnica	2 (Media) Existen algunas experiencias de utilización de RAP en la capa de rodadura y de algunas experiencias en la utilización de WMA en el país. No obstante, la experiencia en la combinación de ambas medidas en nuestro medio es todavía incipiente. El IDU ha realizado investigaciones respecto al comportamiento de WMA con resultados prometedores [179], [180]. La utilización del RAP en las mezclas asfálticas no es aún una práctica generalizada y cuando se ha hecho, una fracción importante se ha empleado en base y subbase.
Regulatoria	2 (Media) Si bien ya existe alguna regulación respecto a utilización del RAP, esta se ha enfocado principalmente en las mezclas calientes y en las frías: el Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) establece que el límite de material reciclado utilizable en mezclas no debe constituir más del 40% de la masa total de la mezcla [181]. Por otro lado, el IDU promulgó la resolución 1115 del 2012 que debe ser tenido en cuenta ya que para promueve el aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición en el distrito capital [182].
Social	2 (Social) Existen algunos prejuicios respecto al uso del RAP en las mezclas asfáltica, ya que generalmente se cree que esto necesariamente afecta la calidad de la mezcla asfáltica. Así mismo, respecto a las mezclas tibias existe la idea entre muchos constructores de vías, de que esa tecnología afecta negativamente el desempeño de la mezcla. Hay un generalizado desconocimiento de las ventajas de la combinación de RAP y WMA en al país.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	Salud y calidad del aire – Positivo Utilizar la tecnología de mezcla asfáltica tibia no solamente disminuye las emisiones de GEI que van a la atmósfera, sino que además reduce la generación de gases nocivos para la salud durante la construcción de las vías. De esta manera, los beneficios incluyen mejoras en las condiciones laborales de los operarios y en las afectaciones a la salud. De acuerdo con [170]. las menores temperaturas de mezclado y pavimentado hacen que se disminuyan las emisiones de gases y olores y genera condiciones laborales menos perjudiciales para los trabajadores. Por cada 12º C de reducción de la temperatura se disminuye en un 50% los gases generados.
	Productividad – Positivo Utilizar la tecnología de RAP permite volver a incorporar a la industria importantes cantidades de residuos. De esta manera se puede construir

Medida 3:	Mezcla asfáltica sostenible
	vías sin utilizar tantos recursos vírgenes y aumentar la productividad de la industria.

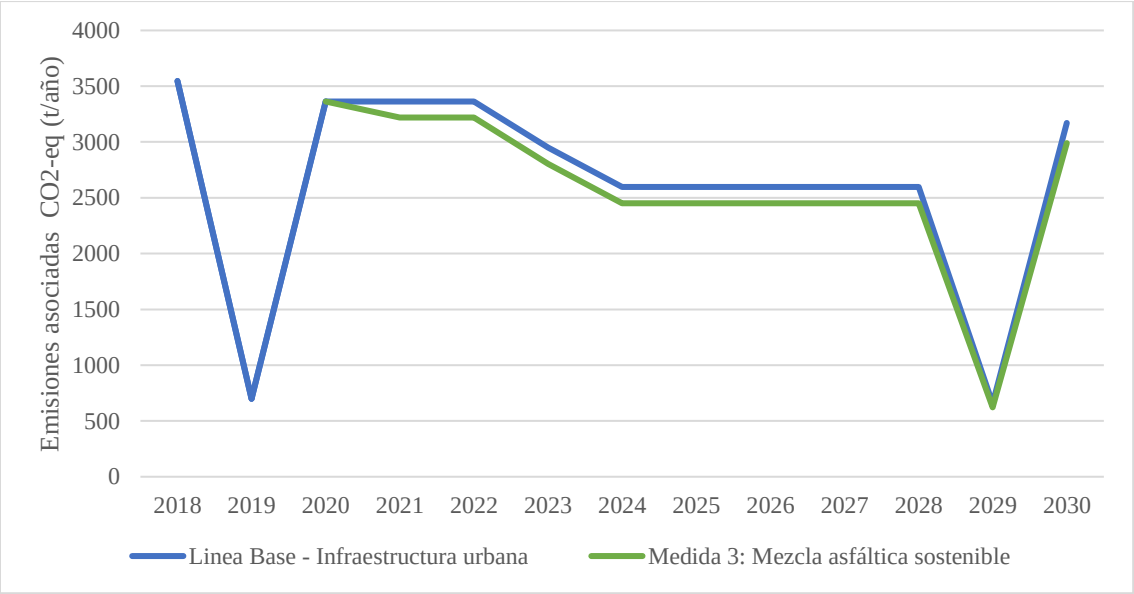


Figura 97. Curva de emisiones para el caso de estudio según la aplicación de la medida 3

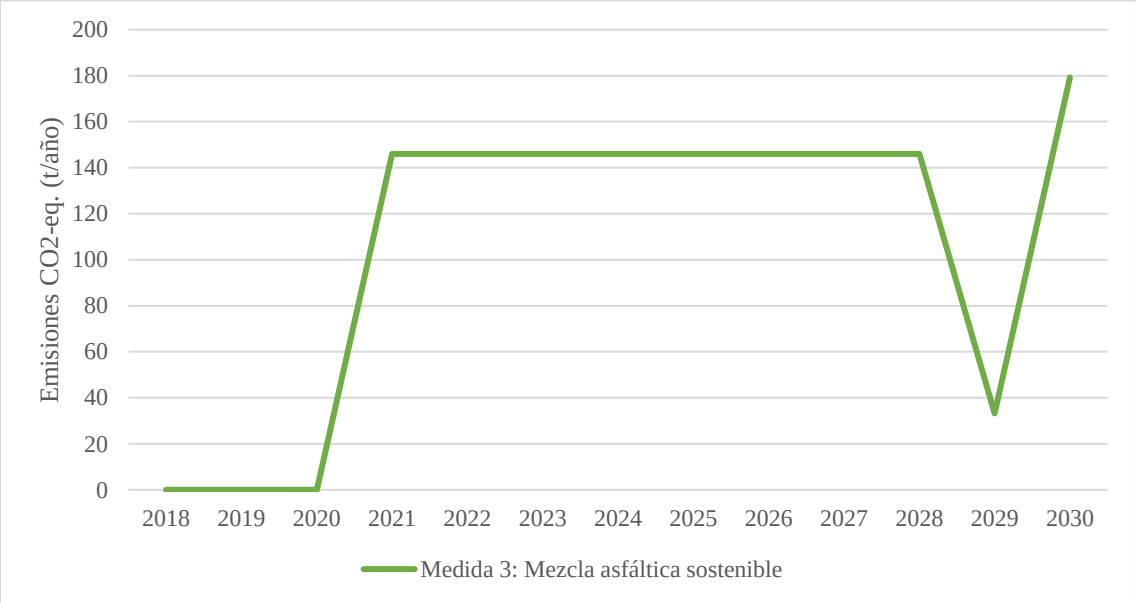


Figura 98. Curva de abatimiento de emisiones para la medida 3

- **Curva MACC de emisiones embebidas**

A partir de los análisis realizados respecto al carbono incorporado se elabora la siguiente curva de costos marginales de abatimiento (MACC) que permite cuantificar las acciones que posibilitan la reducción de las emisiones generadas y los costos asociados a estos. Esta es presentada en la Figura 99.

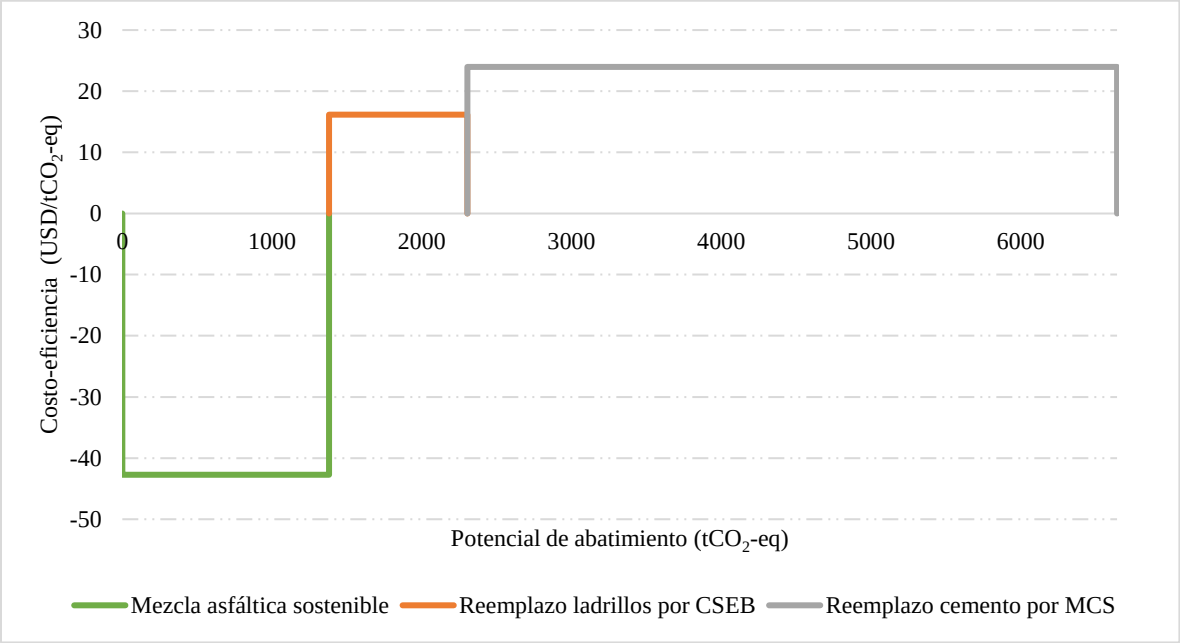


Figura 99 Curva de costos marginales de abatimiento para las medidas contempladas

- **Mitigación emisiones en operación**

- **Edificaciones residenciales**

Las medidas de mitigación de emisiones en la operación de edificios de vivienda de interés social y prioritario consisten en el reemplazo de electrodomésticos y gasodomésticos por equipos con mejor tecnología, que sean energéticamente más eficientes. Estos ahorros de energía potenciales se traducirán en una reducción de emisiones de CO_2-eq.

Tabla 113. Instalación de bombillos LED

Medida 4:	**Instalación de bombillos LED en los hogares**
Categorización:	Infraestructura urbana/Consumo de energía/Nuevas tecnologías
Categorización alternativa:	Energía/Demanda de energía
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: La medida consiste en reemplazar los bombillos de las viviendas por bombillos de tecnología LED, que representan un menor consumo energético que los demás disponibles en el mercado (incandescentes, halógenos, etc.). Para el año base en Ciudad Verde se habían entregado 37613 unidades de vivienda y se proyecta que para el año 2023 se haya entregado la totalidad de las viviendas planeadas (51616). Según la encuesta realizada en este proyecto a una muestra representativa de habitantes de Ciudad Verde, en las viviendas (VIS y VIP) se cuenta con un total de 7 bombillas, con una distribución media de 4 bombillos LED, 2 halógenos o ahorradores y 1 incandescente. Bajo este escenario se definió que en el año 2021 se reemplazaría, en el 50% de las viviendas existentes a este año, la totalidad de los bombillos de tecnología diferente a LED por esta tecnología; en 2022 y 2023 se implementaría la medida en el en el 50% de las viviendas existentes en este año a las que no se ha implementado la medida; y dado que en 2023 se entregan las últimas viviendas del macroproyecto, en 2024 se implementará la medida en la totalidad de las viviendas faltantes. De esta forma, a partir del año 2024 todas	

Medida 4:	**Instalación de bombillos LED en los hogares**
las viviendas de Ciudad Verde contarán con tecnología LED para iluminación.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	10916.62
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	-554.08
Incertidumbre estimación:	2 (Media) El consumo de electricidad por iluminación para la línea base y al aplicar la medida de mitigación, se tomó de una serie de simulaciones energéticas de edificios de vivienda en entorno urbano con características representativas del caso de estudio. El modelo realiza simplificaciones de espacios en las viviendas. Las entradas del cálculo de energía corresponden a características generales de la distribución de bombillos promedio obtenida de la encuesta realizada a los habitantes del proyecto.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	Residuos: La disposición de los equipos que se reemplazan implica un aumento en las emisiones asociadas al transporte de residuos. Este valor no se cuantifica.
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Propietarios de viviendas, desarrolladores de vivienda.
Indirecto	Urbanizador, administración pública, comunidad, propietarios, constructores…
Factibilidad	
Financiera	3 (Alta) El costo por tonelada reducida es negativo y la inversión necesaria por unidad de vivienda es baja.
Técnica	3 (Alta) Se cuenta con experiencia precia en el país en la implementación de esta medida. La distribución de bombillas en la evaluación base demuestra que la implementación de esta tecnología ha sido exitosa en varios casos, a pesar de que aún no hay una penetración total de esta en la operación.
Regulatoria	3 (Alta) No existe reglamentación que impida o dificulte la implementación de la medida.

Medida 4:	**Instalación de bombillos LED en los hogares**
Social	3 (Alta) La evidencia de la encuesta demuestra que en gran proporción de los hogares esta tecnología es el tipo de bombillo más utilizado. Su implementación puede generar un ahorro en el gasto mensual en electricidad de los hogares.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	Social y económico: Reducción del consumo de electricidad del usuario final (~7% frente al consumo base mensual), lo que implica una reducción proporcional en el gasto en electricidad de los usuarios.

Tabla 114. Refrigeradores domésticos eficientes

Medida 5:	**Equipos domésticos de refrigeración eficientes**
Categorización:	Infraestructura urbana/Consumo de energía/Nuevas tecnologías
Categorización alternativa:	Energía/Demanda de energía
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: La medida consiste en reemplazar las neveras de las viviendas por equipos más eficientes, que representan un menor consumo energético. Para el año base en Ciudad Verde se habían entregado 37613 unidades de vivienda y se proyecta que para el año 2023 se haya entregado la totalidad de las viviendas planeadas (51616). Según estudios de caracterización del consumo energético para ciudades como en la que se encuentra el caso de estudio, para este tipo de viviendas los equipos de refrigeración consumen en promedio 70 kWh/mes [38], [183]. Se propone remplazar estos equipos por uno con un consumo esperado de 27.15 kWh/mes. Bajo este escenario se definió que en el año 2021 se remplazaría, en el 50% de las viviendas existentes a este año, la totalidad de los bombillos de tecnología diferente a LED por esta tecnología; entre 2022 y 2024 se implementaría la medida en el en el 50% de las viviendas existentes en este año a las que no se ha implementado la medida; y en 2025 se implementará la medida en la totalidad de las viviendas faltantes. De esta forma, a partir del año 2025 todas las viviendas de Ciudad Verde contarían con equipos de refrigeración eficientes.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	49,428.42
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	-209.31
Incertidumbre estimación:	2 (Media) El consumo de electricidad para la línea base y medida de mitigación se

Medida 5:	Equipos domésticos de refrigeración eficientes
	tomó de fuentes secundarias en las que se generalizan estos valores según tipo de vivienda y ubicación de estas según piso térmico.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	Residuos: La disposición de los equipos que se reemplazan implica un aumento en las emisiones asociadas al transporte de residuos. Este valor no se cuantifica.
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Propietarios de viviendas.
Indirecto	Industria de producción y comercio de electrodomésticos Autoridades para generar programas que faciliten el acceso a estos equipos
Factibilidad	
Financiera	3 (Alta) El costo por tonelada reducida es negativo. Sin embargo, la alta inversión inicial por cada equipo puede representar una barrera de implementación.
Técnica	3 (Alta) Se cuenta con experiencia previa en el país en la implementación de esta medida. No representa cambios mayores pues consiste en reemplazar antiguos equipos por otros con mejor tecnología.
Regulatoria	3 (Alta) No existe reglamentación que impida o dificulte la implementación de la medida.
Social	3 (Alta) En el mediano plazo representará ahorros monetarios para la población, y puede implicar una mejora en la calidad de vida. Sin embargo, es necesario que se implemente algún modelo de financiación que facilite acceder a estos equipos para promover el reemplazo, pues implica una alta inversión inicial.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	Social y económico: Reducción del consumo de electricidad del usuario final (~35% frente al consumo base mensual), lo que implica una reducción proporcional en el gasto en electricidad de los usuarios.

Tabla 115. Instalación de calentadores de agua de paso eléctricos

Medida 6:	Instalación calentadores de paso eléctricos
Categorización:	Infraestructura urbana/Consumo de energía/Nuevas tecnologías
Categorización alternativa:	Energía/Demanda de energía
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general:	

Medida 6:	**Instalación calentadores de paso eléctricos**
La medida consiste en reemplazar los calentadores de agua (duchas eléctricas o calentadores de paso a gas natural) por equipos de paso eléctricos, que representan un menor consumo energético. Para el año base en Ciudad Verde se habían entregado 37613 unidades de vivienda y se proyecta que para el año 2023 se haya entregado la totalidad de las viviendas planeadas (51616). Según estudios de caracterización del consumo energético para ciudades como en la que se encuentra el caso de estudio, para este tipo de viviendas las duchas eléctricas tienen un consumo promedio de 26.8 kWh/mes y los calentadores de gas 10.5 kWh/mes [38], [183]. Se propone remplazar estos equipos por uno con un consumo esperado de 3.3 kWh/mes para las condiciones de comportamiento de viviendas de interés social y prioritario [184]. Según los indicadores de la encuesta de calidad de vida [185], para los municipios colindantes con Bogotá, el 68% de los hogares cuentan con equipos de calentamiento de agua; de los cuales el 33.6% son duchas eléctricas y el 66.4% restante son calentadores de gas. Para la evaluación de esta medida se definió una tasa de incremento anual de la tenencia de equipos domésticos con base a los escenarios de proyección de aumento del PIB de Colombia definidos por el marco fiscal de mediano plazo [47] y la relación histórica entre el aumento del PIB y el aumento de la demanda de electricidad del sector residencial [186]. Bajo este escenario se definió que en el año 2021 se remplazaría, el 100% de los calentadores de agua en las viviendas existentes a este año; y en todas las viviendas que entraran en operación en 2022 y 2023 se implementaría la medida. Adicionalmente, a los nuevos calentadores que ingresaran en operación de allí en adelante por el aumento de la tasa de tenencia del equipo se les implementará la medida. En el escenario definido, para el año 2030, el 87.2% de los hogares contarán con un equipo de calentamiento de agua; de los cuales todos serán el equipo propuesto por la medida.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	11,711.48
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	806.4
Incertidumbre estimación:	3 (Alta) El consumo de electricidad para la línea base se tomó de fuentes secundarias en las que se generalizan estos valores según tipo de vivienda y ubicación de estas según piso térmico. El de la medida de mitigación en el escenario calculado es altamente dependiente variables con mucha incertidumbre, como el tiempo promedio de uso, la tasa de tenencia del equipo y cómo se define su aumento en el tiempo.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	Residuos: La disposición de los equipos que se reemplazan implica un aumento en las emisiones asociadas al transporte de residuos. Este valor no se cuantifica.
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Propietarios de viviendas; desarrolladores de vivienda
Indirecto	Industria de producción y comercio de electrodomésticos Autoridades para generar programas que faciliten el acceso a estos equipos

Medida 6:	**Instalación calentadores de paso eléctricos**
Factibilidad	
Financiera	1 (Baja) El costo por tonelada reducida es mayor a 30 USD/ton. El equipo requiere una alta inversión inicial y en el periodo temporal de análisis (2018-2030) se adquieren equipos hasta el último año, es decir que hay altas inversiones para las que no se alcanzan a evaluar los ahorros asociados a la inversión. Adicionalmente, las inversiones en cada año progresivo tienen menos ventana de tiempo para cuantificar los ahorros para el retorno de la inversión.
Técnica	2 (Media) Se cuenta con experiencia previa en el país en algunos pilotos, mas es una tecnología poco explorada en el contexto nacional. Sin embargo, en otros países es una tecnología comúnmente utilizada.
Regulatoria	3 (Alta) No existe reglamentación que impida o dificulte la implementación de la medida.
Social	2 (Media) En el mediano plazo, quienes contaban con ducha eléctrica tendrán un ahorro monetario considerable y la recuperación de la inversión. Empero, quienes contaban con calentadores de gas reflejarán un ahorro monetario menor y el retorno de la inversión tomará más años. Este factor puede representar una barrera para la aceptación de la medida en la comunidad.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	NA

Tabla 116. Estufas de inducción (eléctricas)

Medida 7:	**Instalación de estufas de inducción**
Categorización:	Infraestructura urbana/Consumo de energía/Nuevas tecnologías
Categorización alternativa:	Energía/Demanda de energía
Tipo de medida:	Mitigación

Descripción general:
La medida consiste en reemplazar las estufas domésticas por equipos de inducción (eléctricos), que representan un menor consumo energético. Para el año base en Ciudad Verde se habían entregado 37613 unidades de vivienda y se proyecta que para el año 2023 se haya entregado la totalidad de las viviendas planeadas (51616). Según estudios de caracterización del consumo energético para ciudades como en la que se encuentra el caso de estudio, para este tipo de viviendas las estufas tienen un consumo promedio de 185.8 kWh/mes y los equipos de inducción 103.5 kWh/mes para las condiciones de comportamiento de viviendas de interés social y prioritario [38], [89], [184], [187].

Bajo este escenario se definió que en el año 2021 se remplazarían las estufas en el 50% de las viviendas existentes a este año; en 2022 y 2023 se implementaría la medida en el en el 50% de las viviendas existentes en este año a las que no se ha implementado la medida; y en 2024 se implementará la medida en la totalidad de las viviendas faltantes. De esta forma, a partir del año 2025 todas las viviendas de Ciudad Verde contarían con la medida implementada.

Medida 7:	**Instalación de estufas de inducción**
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	79,459.05
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	457.73
Incertidumbre estimación:	2 (Media) El consumo de electricidad para la línea base y para la medida de mitigación se tomó de fuentes secundarias en las que se generalizan estos valores según tipo de vivienda y ubicación de estas según piso térmico.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	Residuos: La disposición de los equipos que se reemplazan implica un aumento en las emisiones asociadas al transporte de residuos. Este valor no se cuantifica.
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Propietarios de viviendas; desarrolladores de vivienda
Indirecto	Industria de producción y comercio de electrodomésticos Autoridades para generar programas que faciliten el acceso a estos equipos
Factibilidad	
Financiera	1 (Baja) El costo por tonelada reducida es mayor a 30 USD/ton. El equipo requiere una alta inversión inicial y a pesar de ser una medida con alto abatimiento de emisiones, no genera ahorros monetarios para los usuarios.
Técnica	2 (Media) Se cuenta con experiencia previa en el país en viviendas no sociales de instalación de estos equipos desde la entrega de la vivienda, pero por el carácter económico no se ha aplicado en vivienda social y prioritario.
Regulatoria	3 (Alta) No existe reglamentación que impida o dificulte la implementación de la medida.
Social	2 (Media) La inversión y los costos de operación generan un aumento en el costo de vida de los usuarios, con el fin de una reducción de las emisiones. La totalidad de los costos de esta reducción deberán ser asumidos por el

Medida 7:	**Instalación de estufas de inducción**
	usuario, y esto es una barrera de aceptación de la medida entre la comunidad.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	NA

Tabla 117. Lavadoras con mayor eficiencia energética

Medida 8:	**Lavadoras con mayor eficiencia energética***
Categorización:	Infraestructura urbana/Consumo de energía/Nuevas tecnologías
Categorización alternativa:	Energía/Demanda de energía
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: La medida consiste en reemplazar las lavadoras de ropa por equipos más eficientes que representan un menor consumo energético. Para el año base en Ciudad Verde se habían entregado 37613 unidades de vivienda y se proyecta que para el año 2023 se haya entregado la totalidad de las viviendas planeadas (51616). Según estudios de caracterización del consumo energético para ciudades como en la que se encuentra el caso de estudio, para este tipo de viviendas las lavadoras tienen un consumo promedio de 5.4 kWh/mes [89] y el equipo que plantea la medida, para las condiciones de comportamiento de viviendas de interés social y prioritario, tiene un consumo de 3 kWh/mes [184], [188]. Según los indicadores de la encuesta de calidad de vida [185], para los municipios colindantes con Bogotá, el 84.16% de los hogares cuentan con lavadoras de ropa. Para la evaluación de esta medida se definió una tasa de incremento anual de la tenencia de equipos domésticos con base a los escenarios de proyección de aumento del PIB de Colombia definidos por el marco fiscal de mediano plazo [47] y la relación histórica entre el aumento del PIB y el aumento de la demanda de electricidad del sector residencial [186]. Bajo este escenario se definió que en el año 2021 se remplazarían las lavadoras en el 50% de las viviendas existentes a este año; en 2022 y 2023 se implementaría la medida en el en el 50% de las viviendas existentes en este año a las que no se ha implementado la medida; y de 2024 a 2026 se implementará la medida en la totalidad de los nuevos equipos. De esta forma, a partir del año 2027 todas las viviendas de Ciudad Verde contarían con la medida implementada. *Los valores de mitigación y costo eficiencia reportados en esta ficha corresponden a los ahorros en consumo de energía eléctrica. En la Tabla 72 del sector *Manejo integrado del agua* se muestran los resultados acumulados por el ahorro en el consumo de energía y de agua potable al implementar esta medida.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	2,905,731.56 m3
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	2,511.87
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	6108.1
Incertidumbre estimación:	2 (Media)

Medida 8:	**Lavadoras con mayor eficiencia energética***
	Los consumos de electricidad para la línea base y para la medida de mitigación se tomaron de fuentes secundarias en las que se generalizan estos valores según tipo de vivienda y ubicación de estas según piso térmico.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	Agua: 2,255.75
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	Residuos: La disposición de los equipos que se reemplazan implica un aumento en las emisiones asociadas al transporte de residuos. Este valor no se cuantifica.
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Propietarios de viviendas
Indirecto	Industria de producción y comercio de electrodomésticos Autoridades para generar programas que faciliten el acceso a estos equipos
Factibilidad	
Financiera	1 (Baja) El costo por tonelada reducida es mayor a 30 USD/ton. El equipo requiere una alta inversión inicial y tiene un bajo potencial de abatimiento y ahorro, por esta razón no hay recuperación de la inversión.
Técnica	3 (Alta) Se cuenta con experiencia previa en el país en la implementación de esta medida. No representa cambios mayores pues consiste en reemplazar antiguos equipos por otros con mejor tecnología.
Regulatoria	3 (Alta) No existe reglamentación que impida o dificulte la implementación de la medida.
Social	1 (Baja) La inversión y los costos de operación generan un aumento en el costo de vida de los usuarios, puesto que la medida no representa un ahorro significativo de energía no se generan ahorros monetarios para los usuarios.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	NA

En la Figura 100 se presenta la curva de emisiones para la operación del stock de vivienda en el periodo de análisis, contrastando el caso base con las potenciales emisiones generadas al implementar cada una de las medidas según los escenarios de implementación definidos en las fichas de las medidas. En la Figura 101 se presenta la curva de abatimiento de emisiones de cada medida para cada año en el periodo de análisis, según el escenario de implementación definido para cada medida.

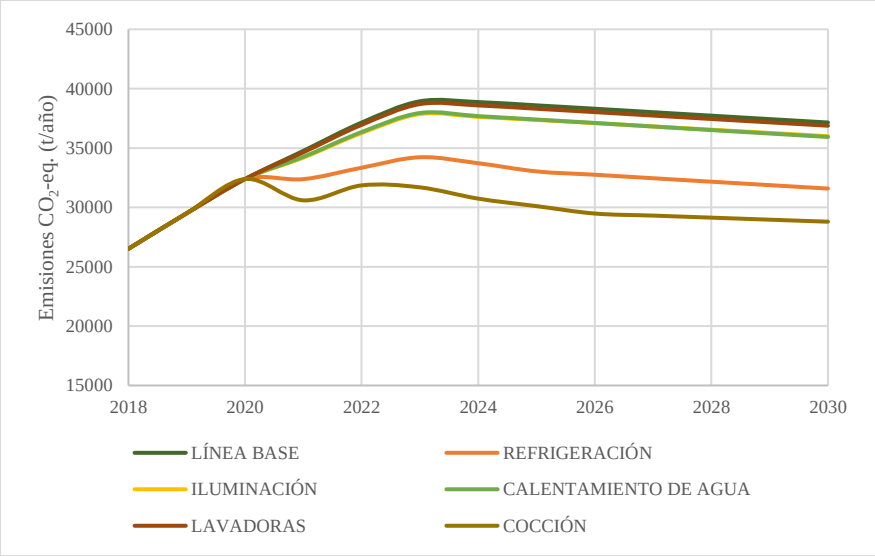


Figura 100. Curvas de emisiones para el caso de estudio según la aplicación de cada medida

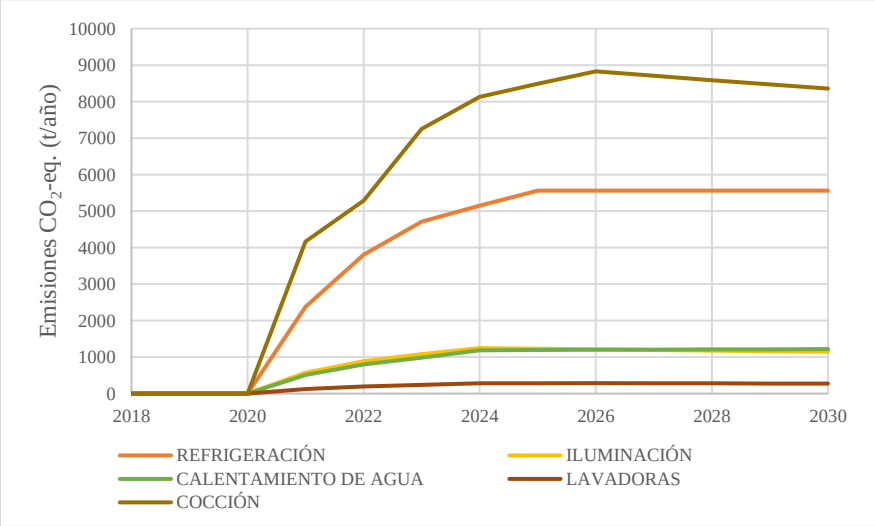


Figura 101. Curva de abatimiento de emisiones para cada medida

Los resultados de costo-eficiencia junto con el abatimiento para cada medida se presentan en la curva de costos marginales de abatimiento (MACC) de la Figura 102. En esta se evidencia que con la implementación de las medidas de iluminación y refrigeración se tiene un potencial abatimiento alrededor de 60,000 tCO_2-eq. y una generación de ahorros económicos. Las demás medidas requieren una serie de costos para generar un ahorro cercano a las 100,000 tCO_2-eq.

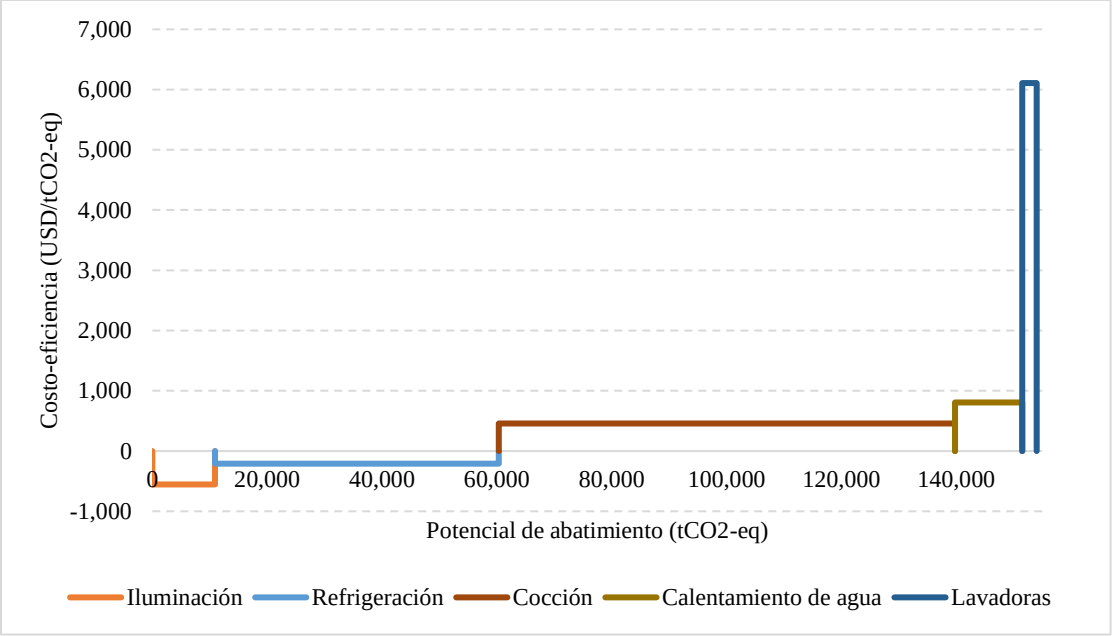


Figura 102. Curva de costos marginales de abatimiento para la operación del sector residencial

- ***Edificaciones no residenciales***

Para la tipología de centros comerciales se evaluaron dos medidas, (1) aislamiento térmico del techo y (2) sensores de ocupación. La tipología de equipamientos relacionados con salud contempla dos medidas, (1) controles de iluminación y (2) sensores fotoeléctricos. Por último, los colegios se intervendrán con dos medidas, (1) sensores de ocupación y (2) sensores fotoeléctricos. La caracterización completa de las medidas puede consultarse en las fichas a continuación.

Tabla 118. Aislamiento térmico del techo (Centro Comercial)

Medida 9:	Aislamiento térmico del techo (Centro Comercial)
Categorización:	Edificación/ Consumo de energía/ Eficiencia energética
Categorización alternativa:	Edificación/ Consumo de energía
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: Aplicación a todo el stock de centros comerciales. Se intervendrán 18,602 m^2 construidos de centros comerciales en total. El stock de centros comerciales se intervendrá en un periodo de 2 años (2021-2022). Se tiene un impacto en la reducción de emisiones por cuenta de la reducción en la demanda de electricidad. Se contemplan ahorros monetarios debido a la reducción en el consumo de electricidad (aire acondicionado). Se contemplan costos de implementación y *retrofit*. No hay costos por mantenimiento. Las especificaciones técnicas definen un aislamiento con valor U de 0.44 W/m^2K.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA

Medida 9:	Aislamiento térmico del techo (Centro Comercial)
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	398
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	-646
Incertidumbre estimación:	2 (Media) El desempeño y los costos se cuantificaron con información primaria o información secundaria proveniente de contextos similares en el país. Se simplifican o excluyen procesos de emisión y captura de carbono relevantes para la estimación del abatimiento total.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Promotor, Constructor, Administración pública
Indirecto	Comunidad
Factibilidad	
Financiera	3 (Alta) Costo por tonelada reducida menor al valor del impuesto al carbono en Colombia (5USD/tCO2-eq).
Técnica	3 (Alta) Se cuenta con experiencia previa en el país para su construcción y mantenimiento.
Regulatoria	3 (Alta) Existen elementos en las leyes y regulaciones vigentes que permiten su implementación. Resolución 549 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio por la cual se establecen los porcentajes de ahorro en agua y energía según clima y tipo de edificaciones: • Anexo 1 Guía de Construcción Sostenible • Protocolo de Implementación en la ciudad de Bogotá
Social	3 (Alta) La medida puede tener una aceptación alta, mejora la calidad de vida y no genera riesgos para la población.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	• Empleo: Positivo • Salud: Neutro • Educación: Neutro • Confort: Neutro • Crecimiento económico: Positivo

Medida 9:	Aislamiento térmico del techo (Centro Comercial)
	• Productividad: Neutro

Tabla 119. Sensores de ocupación (Centro Comercial)

Medida 10:	Sensores de ocupación (Centro Comercial)
Categorización:	Edificación/ Consumo de energía/ Eficiencia energética
Categorización alternativa:	Edificación/ Consumo de energía
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: Aplicación a todo el stock de centros comerciales. Se intervendrán 18,602 m^2 construidos de centros comerciales en total. El stock de centros comerciales se intervendrá en un periodo de 2 años (2021-2022). Se tiene un impacto en la reducción de emisiones por cuenta de la reducción en la demanda de electricidad. Se contemplan ahorros monetarios debido a la reducción en el consumo de electricidad (iluminación). Se contemplan costos de implementación y *retrofit*. No hay costos por mantenimiento. Las especificaciones técnicas definen la implementación en baños.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	6
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	-89
Incertidumbre estimación:	2 (Media) El desempeño y los costos se cuantificaron con información primaria o información secundaria proveniente de contextos similares en el país. Se simplifican o excluyen procesos de emisión y captura de carbono relevantes para la estimación del abatimiento total.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Promotor, Constructor, Administración pública
Indirecto	Comunidad
Factibilidad	

Medida 10:	Sensores de ocupación (Centro Comercial)
Financiera	3 (Alta) Costo por tonelada reducida menor al valor del impuesto al carbono en Colombia (5USD/tCO2-eq).
Técnica	3 (Alta) Se cuenta con experiencia previa en el país para su construcción y mantenimiento.
Regulatoria	3 (Alta) Existen elementos en las leyes y regulaciones vigentes que permiten su implementación. Resolución 549 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio por la cual se establecen los porcentajes de ahorro en agua y energía según clima y tipo de edificaciones: • Anexo 1 Guía de Construcción Sostenible • Protocolo de Implementación en la ciudad de Bogotá
Social	3 (Alta) La medida puede tener una aceptación alta, mejora la calidad de vida y no genera riesgos para la población.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	• Empleo: Positivo • Salud: Neutro • Educación: Positivo • Confort: Neutro • Crecimiento económico: Positivo • Productividad: Positivo

Tabla 120. Control de iluminación (Salud)

Medida 11:	Control de iluminación (Salud)
Categorización:	Edificación/ Consumo de energía/ Eficiencia energética
Categorización alternativa:	Edificación/ Consumo de energía
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: Aplicación al hospital nuevo cuya entrega está planeada para el 2023. Se intervendrán 25,451 m^2 construidos de hospital. El hospital se intervendrá en un periodo de 1 año (2023). Se tiene un impacto en la reducción de emisiones por cuenta de la reducción en la demanda de electricidad. Se contemplan ahorros monetarios debido a la reducción en el consumo de electricidad (iluminación). Se contemplan costos de implementación y *retrofit*. No hay costos por mantenimiento. Las especificaciones técnicas definen la implementación en pasillos.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA

Medida 11:	Control de iluminación (Salud)
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	49
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	-197
Incertidumbre estimación:	2 (Media) El desempeño y los costos se cuantificaron con información primaria o información secundaria proveniente de contextos similares en el país. Se simplifican o excluyen procesos de emisión y captura de carbono relevantes para la estimación del abatimiento total.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Promotor, Constructor, Administración pública
Indirecto	Comunidad
Factibilidad	
Financiera	3 (Alta) Costo por tonelada reducida menor al valor del impuesto al carbono en Colombia (5USD/tCO2-eq).
Técnica	3 (Alta) Se cuenta con experiencia previa en el país para su construcción y mantenimiento.
Regulatoria	3 (Alta) Existen elementos en las leyes y regulaciones vigentes que permiten su implementación. Resolución 549 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio por la cual se establecen los porcentajes de ahorro en agua y energía según clima y tipo de edificaciones: • Anexo 1 Guía de Construcción Sostenible • Protocolo de Implementación en la ciudad de Bogotá
Social	3 (Alta) La medida puede tener una aceptación alta, mejora la calidad de vida y no genera riesgos para la población.
Cobeneficios / Otros beneficios	

Medida 11:	Control de iluminación (Salud)
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	• Empleo: Positivo • Salud: Neutro • Educación: Positivo • Confort: Neutro • Crecimiento económico: Positivo • Productividad: Positivo •

Tabla 121. Sensores fotoeléctricos (Salud)

Medida 12:	Sensores fotoeléctricos (Salud)
Categorización:	Edificación/ Consumo de energía/ Eficiencia energética
Categorización alternativa:	Edificación/ Consumo de energía
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: Aplicación al hospital nuevo cuya entrega está planeada para el 2023. Se intervendrán 25,451 m^2 construidos de hospital. El hospital se intervendrá en un periodo de 1 año (2023). Se tiene un impacto en la reducción de emisiones por cuenta de la reducción en la demanda de electricidad. Se contemplan ahorros monetarios debido a la reducción en el consumo de electricidad (iluminación). Se contemplan costos de implementación y *retrofit*. No hay costos por mantenimiento. Las especificaciones técnicas definen la implementación en espacios interiores.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	126
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	-374
Incertidumbre estimación:	Calificación 2 de 4 (Media) El desempeño y los costos se cuantificaron con información primaria o información secundaria proveniente de contextos similares en el país. Se simplifican o excluyen procesos de emisión y captura de carbono relevantes para la estimación del abatimiento total.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Promotor, Constructor, Administración pública

Medida 12:	Sensores fotoeléctricos (Salud)
Indirecto	Comunidad
Factibilidad	
Financiera	Calificación 3 de 3 (Alta) Costo por tonelada reducida menor al valor del impuesto al carbono en Colombia (5USD/tCO2-eq).
Técnica	Calificación 3 de 3 (Alta) Se cuenta con experiencia previa en el país para su construcción y mantenimiento.
Regulatoria	Calificación 3 de 3 (Alta) Existen elementos en las leyes y regulaciones vigentes que permiten su implementación. Resolución 549 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio por la cual se establecen los porcentajes de ahorro en agua y energía según clima y tipo de edificaciones: • Anexo 1 Guía de Construcción Sostenible • Protocolo de Implementación en la ciudad de Bogotá
Social	Calificación 3 de 3 (Alta) La medida puede tener una aceptación alta, mejora la calidad de vida y no genera riesgos para la población.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	• Empleo: Positivo • Salud: Neutro • Educación: Positivo • Confort: Neutro • Crecimiento económico: Positivo • Productividad: Positivo

Tabla 122. Sensores de ocupación (Colegios)

Medida 13:	Sensores de ocupación (Colegios)
Categorización:	Edificación/ Consumo de energía/ Eficiencia energética
Categorización alternativa:	Edificación/ Consumo de energía
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: Aplicación a todo el stock de colegios, incluyendo colegios existentes y nuevos. Se intervendrán 39,472 m^2 de colegios existentes y 7,786 m^2 de colegios nuevos, para un total de 47,258 m^2. El stock de colegios existentes se intervendrá en un periodo de 3 años (2021-2023). El stock de colegios nuevos se intervendrá en un periodo de 1 año (2021). Se tiene un impacto en la reducción de emisiones por cuenta de la reducción en la demanda de electricidad. Se contemplan ahorros monetarios debido a la reducción en el consumo de electricidad (iluminación). Se contemplan costos de implementación y *retrofit*. No hay costos por mantenimiento. Las especificaciones técnicas definen la implementación en aulas de clase.	

Medida 13:	Sensores de ocupación (Colegios)
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	44
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	566
Incertidumbre estimación:	Calificación 2 de 4 (Media) El desempeño y los costos se cuantificaron con información primaria o información secundaria proveniente de contextos similares en el país. Se simplifican o excluyen procesos de emisión y captura de carbono relevantes para la estimación del abatimiento total.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Promotor, Constructor, Administración pública
Indirecto	Comunidad
Factibilidad	
Financiera	Calificación 1 de 3 (Baja) Costo por tonelada reducida menor al mayor valor del impuesto al carbono reportado a nivel mundial. Barrera principal: ahorros por reducción bajos
Técnica	Calificación 3 de 3 (Alta) Se cuenta con experiencia previa en el país para su construcción y mantenimiento.
Regulatoria	Calificación 3 de 3 (Alta) Existen elementos en las leyes y regulaciones vigentes que permiten su implementación. Resolución 549 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio por la cual se establecen los porcentajes de ahorro en agua y energía según clima y tipo de edificaciones: • Anexo 1 Guía de Construcción Sostenible • Protocolo de Implementación en la ciudad de Bogotá

Medida 13:	Sensores de ocupación (Colegios)
Social	Calificación 3 de 3 (Alta) La medida puede tener una aceptación alta, mejora la calidad de vida y no genera riesgos para la población.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	• Empleo: Positivo • Salud: Neutro • Educación: Positivo • Confort: Neutro • Crecimiento económico: Positivo • Productividad: Positivo

Tabla 123. Sensores fotoeléctricos (Colegios)

Medida 14:	Sensores fotoeléctricos (Colegios)
Categorización:	Edificación/ Consumo de energía/ Eficiencia energética
Categorización alternativa:	Edificación/ Consumo de energía
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: Aplicación a todo el stock de colegios, incluyendo colegios existentes y nuevos. Se intervendrán 39,472 m^2 de colegios existentes y 7,786 m^2 de colegios nuevos, para un total de 47,258 m^2. El stock de colegios existentes se intervendrá en un periodo de 3 años (2021-2023). El stock de colegios nuevos se intervendrá en un periodo de 1 año (2021). Se tiene un impacto en la reducción de emisiones por cuenta de la reducción en la demanda de electricidad. Se contemplan ahorros monetarios debido a la reducción en el consumo de electricidad (iluminación). Se contemplan costos de implementación y *retrofit*. No hay costos por mantenimiento. Las especificaciones técnicas definen la implementación en espacios interiores.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	255
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	-248
Incertidumbre estimación:	Calificación 2 de 4 (Media) El desempeño y los costos se cuantificaron con información primaria o información secundaria proveniente de contextos similares en el país. Se simplifican o excluyen procesos de emisión y captura de carbono relevantes para la estimación del abatimiento total.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA

Medida 14:	Sensores fotoeléctricos (Colegios)
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Promotor, Constructor, Administración pública
Indirecto	Comunidad
Factibilidad	
Financiera	Calificación 3 de 3 (Alta) Costo por tonelada reducida menor al valor del impuesto al carbono en Colombia (5USD/tCO2-eq).
Técnica	Calificación 3 de 3 (Alta) Se cuenta con experiencia previa en el país para su construcción y mantenimiento.
Regulatoria	Calificación 3 de 3 (Alta) Existen elementos en las leyes y regulaciones vigentes que permiten su implementación. Resolución 549 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio por la cual se establecen los porcentajes de ahorro en agua y energía según clima y tipo de edificaciones: • Anexo 1 Guía de Construcción Sostenible • Protocolo de Implementación en la ciudad de Bogotá
Social	Calificación 3 de 3 (Alta) La medida puede tener una aceptación alta, mejora la calidad de vida y no genera riesgos para la población.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	• Empleo: Positivo • Salud: Neutro • Educación: Positivo • Confort: Neutro • Crecimiento económico: Positivo • Productividad: Positivo

La Figura 103 presenta las emisiones asociadas a la línea base y líneas de mitigación para cada una de las medidas contempladas en el sector no residencial. Asimismo, el potencial de abatimiento se muestra en la Figura 104.

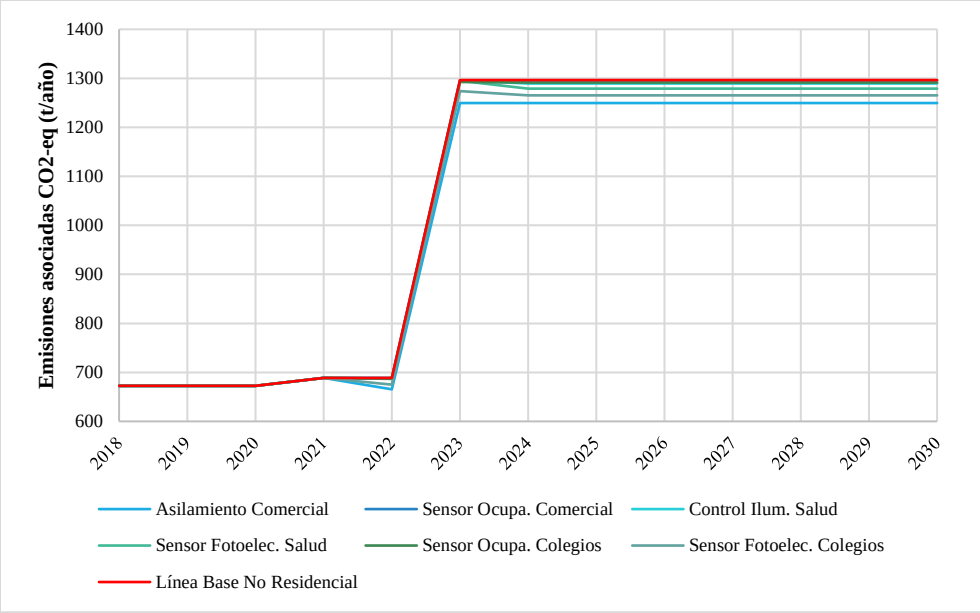


Figura 103. Mitigación de emisiones en sector no residencial

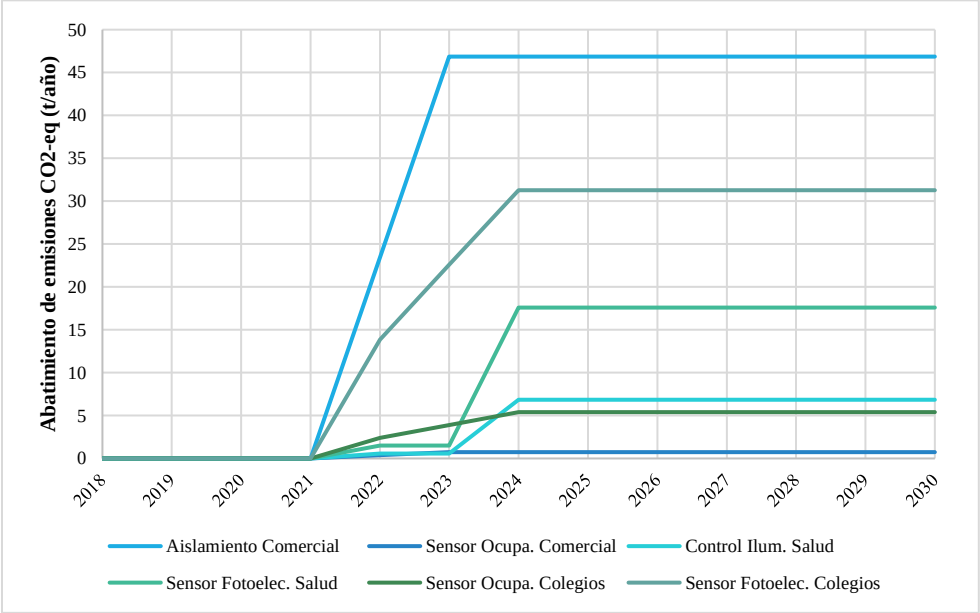


Figura 104. Potencial de abatimiento en sector no residencial

Los resultados de costo-eficiencia junto con el abatimiento de cada medida se presentan en una curva de costos marginales de abatimiento. En la Figura 105 puede observarse como la medida 1 de colegios es la única estrategia de mitigación que presenta una costo-eficiencia positiva. Por el contrario, el resto de las medidas presentan una costo-eficiencia negativa, significando una reducción en las emisiones y una generación de ahorros al implementarlas.

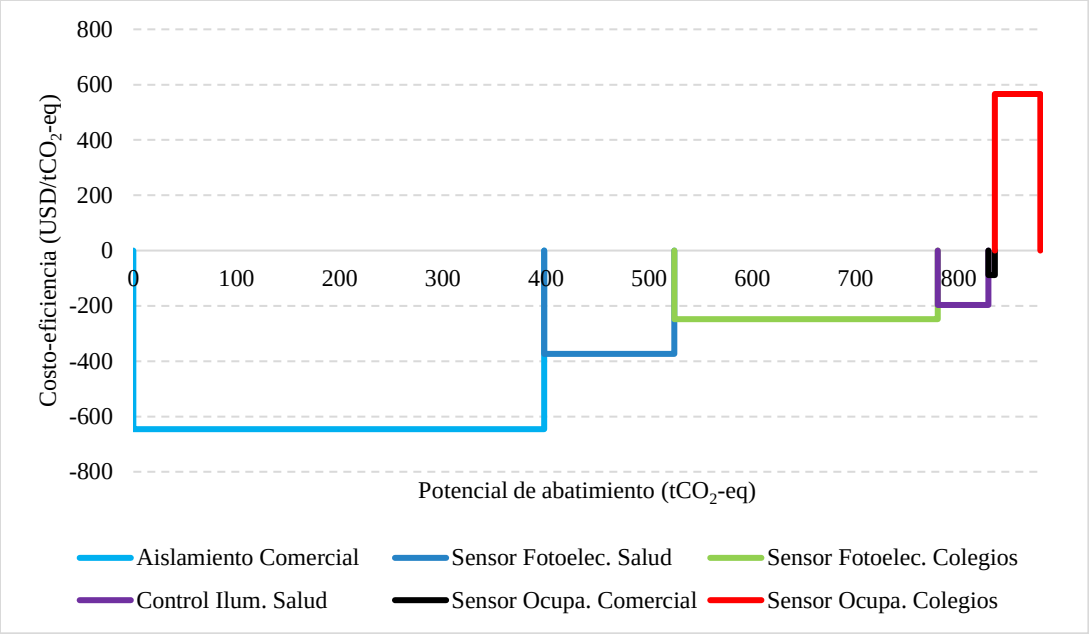


Figura 105. Curva de costos marginales de abatimiento para el sector no residencial

- **Medidas de mejora del sector residencial**

Las medidas de mejora estudiadas en Ciudad Verde corresponden a estrategias pasivas de ahorro de energía. Estas medidas se incorporan en el diseño arquitectónico de las edificaciones y propenden por el aprovechamiento de las condiciones ambientales, maximizando las fuentes de control térmico, ventilación y reducción energética naturales para crear condiciones de confort para sus ocupantes. A diferencias de las estrategias activas de ahorro, las pasivas no involucran sistemas mecánicos o eléctricos. Para el caso específico de estudio, las unidades de vivienda no cuentan con sistemas de calefacción, por lo tanto, el principal efecto de implementar las estrategias pasivas es la mejora del confort térmico al interior de las viviendas.

La envolvente de los edificios juega un papel crucial en la implementación de las medidas pasivas. Una edificación correctamente diseñada tendrá una envolvente que mejora el confort de sus ocupantes con poca o ninguna dependencia de medios artificiales. La caracterización completa de las estrategias pasivas analizadas para Ciudad Verde se presenta en las fichas a continuación, y contemplan intervenciones en la cubierta, paredes, ventanas y demás componentes de la capa exterior del edificio.

Tabla 124. Aumento de la proporción de vidrio en la fachada exterior (Vivienda)

Medida 15:	Aumento de la proporción de vidrio en la fachada exterior (Vivienda)
Categorización:	Edificación/ Consumo de energía/ Eficiencia energética
Categorización alternativa:	Edificación/ Consumo de energía
Tipo de medida:	Mitigación (Mejora confort)
Descripción general: Aplicación a todo el stock de unidades residenciales nuevas. Se intervendrán 7,877 viviendas nuevas en total. El stock de viviendas nuevas se intervendrá en un periodo de 3 años (2021-2023). No se tiene un impacto en la reducción de emisiones. Su principal efecto es sobre el confort térmico. No se contemplan ahorros monetarios por cuenta de reducciones en el consumo. Se contemplan costos de implementación. No hay costos por mantenimiento.	

Medida 15:	Aumento de la proporción de vidrio en la fachada exterior (Vivienda)
Las especificaciones técnicas definen una proporción de vidrio en fachada (WWR) de 40%.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	0
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	7,132 (Aunque la medida no mitigue emisiones en su sector, la costo-eficiencia se calculó con las emisiones mitigadas de otros sectores)
Incertidumbre estimación:	Calificación 2 de 4 (Media) El desempeño y los costos se cuantificaron con información primaria o información secundaria proveniente de contextos similares en el país. Se simplifican o excluyen procesos de emisión y captura de carbono relevantes para la estimación del abatimiento total.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	• Edificación/ Procesos constructivos: 334.23 • Residuos/ Gestión de residuos: 1.70
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Promotor, Constructor, Administración pública
Indirecto	Comunidad
Factibilidad	
Financiera	Calificación 1 de 3 (Baja) Costo por tonelada reducida menor al mayor valor del impuesto al carbono reportado a nivel mundial. Esta medida no contempla ahorros por reducción en el consumo de electricidad. Solo se tiene en cuenta el costo de implementación.
Técnica	Calificación 3 de 3 (Alta) Se cuenta con experiencia previa en el país para su construcción y mantenimiento.
Regulatoria	Calificación 3 de 3 (Alta) Existen elementos en las leyes y regulaciones vigentes que permiten su implementación. Resolución 549 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio por la cual se establecen los porcentajes de ahorro en agua y energía según clima y tipo de edificaciones: • Anexo 1 Guía de Construcción Sostenible • Protocolo de Implementación en la ciudad de Bogotá
Social	Calificación 3 de 3 (Alta) La medida puede tener una aceptación alta, mejora la calidad de vida y no genera riesgos para la población.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	• Empleo: Neutro • Salud: Positivo

Medida 15:	Aumento de la proporción de vidrio en la fachada exterior (Vivienda)
	• Educación: Neutro • Confort: Positivo (-0.03°C) • Crecimiento económico: Neutro • Productividad: Neutro

Tabla 125. Aislamiento térmico del techo (Vivienda)

Medida 16:	Aislamiento térmico del techo (Vivienda)
Categorización:	Edificación/ Consumo de energía/ Eficiencia energética
Categorización alternativa:	Edificación/ Consumo de energía
Tipo de medida:	Mitigación (Mejora de confort)
Descripción general: Aplicación a todo el stock de vivienda, incluyendo unidades residenciales existentes y nuevas. Se intervendrán 43,739 viviendas existentes y 7,877 viviendas nuevas, para un total de 51,616 viviendas. El stock de viviendas existentes se intervendrá en un periodo de 5 años (2021-2025). El stock de viviendas nuevas se intervendrá en un periodo de 3 años (2021-2023). No se tiene un impacto en la reducción de emisiones. Su principal efecto es sobre el confort térmico. No se contemplan ahorros monetarios por cuenta de reducciones en el consumo. Se contemplan costos de implementación y *retrofit*. No hay costos por mantenimiento. Las especificaciones técnicas definen un aislamiento con valor U de 0.45 W/m^2K.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	0
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	No aplica
Incertidumbre estimación:	Calificación 2 de 4 (Media) El desempeño y los costos se cuantificaron con información primaria o información secundaria proveniente de contextos similares en el país. Se simplifican o excluyen procesos de emisión y captura de carbono relevantes para la estimación del abatimiento total.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Promotor, Constructor, Administración pública
Indirecto	Comunidad
Factibilidad	
Financiera	Calificación 1 de 3 (Baja) Costo por tonelada reducida menor al mayor valor del impuesto al carbono reportado a nivel mundial. Esta medida no contempla ahorros por reducción en el consumo de electricidad. Solo se tiene en cuenta el costo de implementación.
Técnica	Calificación 3 de 3 (Alta) Se cuenta con experiencia previa en el país para su construcción y mantenimiento.

Medida 16:	Aislamiento térmico del techo (Vivienda)
Regulatoria	Calificación 3 de 3 (Alta) Existen elementos en las leyes y regulaciones vigentes que permiten su implementación. Resolución 549 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio por la cual se establecen los porcentajes de ahorro en agua y energía según clima y tipo de edificaciones: • Anexo 1 Guía de Construcción Sostenible • Protocolo de Implementación en la ciudad de Bogotá
Social	Calificación 3 de 3 (Alta) La medida puede tener una aceptación alta, mejora la calidad de vida y no genera riesgos para la población.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	• Empleo: Muy positivo • Salud: Positivo • Educación: Neutro • Confort: Positivo (+0.18°C) • Crecimiento económico: Positivo • Productividad: Neutro

Tabla 126. Aislamiento térmico de paredes externas (Vivienda)

Medida 17:	Aislamiento térmico de paredes externas (Vivienda)
Categorización:	Edificación/ Consumo de energía/ Eficiencia energética
Categorización alternativa:	Edificación/ Consumo de energía
Tipo de medida:	Mitigación (Mejora de confort)
Descripción general: Aplicación a todo el stock de vivienda, incluyendo unidades residenciales existentes y nuevas. Se intervendrán 43,739 viviendas existentes y 7,877 viviendas nuevas, para un total de 51,616 viviendas. El stock de viviendas existentes se intervendrá en un periodo de 5 años (2021-2025). El stock de viviendas nuevas se intervendrá en un periodo de 3 años (2021-2023). No se tiene un impacto en la reducción de emisiones. Su principal efecto es sobre el confort térmico. No se contemplan ahorros monetarios por cuenta de reducciones en el consumo. Se contemplan costos de implementación y *retrofit*. No hay costos por mantenimiento. Las especificaciones técnicas definen un aislamiento con valor U de 1.32 W/m^2K.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	0
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	No aplica
Incertidumbre estimación:	Calificación 2 de 4 (Media) El desempeño y los costos se cuantificaron con información primaria o información secundaria proveniente de contextos similares en el país. Se simplifican o excluyen procesos de emisión y captura de carbono relevantes para la estimación del abatimiento total.

Medida 17:	Aislamiento térmico de paredes externas (Vivienda)
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Promotor, Constructor, Administración pública
Indirecto	Comunidad
Factibilidad	
Financiera	Calificación 1 de 3 (Baja) Costo por tonelada reducida menor al mayor valor del impuesto al carbono reportado a nivel mundial. Esta medida no contempla ahorros por reducción en el consumo de electricidad. Solo se tiene en cuenta el costo de implementación.
Técnica	Calificación 3 de 3 (Alta) Se cuenta con experiencia previa en el país para su construcción y mantenimiento.
Regulatoria	Calificación 3 de 3 (Alta) Existen elementos en las leyes y regulaciones vigentes que permiten su implementación. Resolución 549 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio por la cual se establecen los porcentajes de ahorro en agua y energía según clima y tipo de edificaciones: • Anexo 1 Guía de Construcción Sostenible • Protocolo de Implementación en la ciudad de Bogotá
Social	Calificación 3 de 3 (Alta) La medida puede tener una aceptación alta, mejora la calidad de vida y no genera riesgos para la población.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	• Empleo: Muy positivo • Salud: Positivo • Educación: Neutro • Confort: Muy positivo (+0.92°C) • Crecimiento económico: Positivo • Productividad: Neutro

Tabla 127. Vidrio de alto rendimiento térmico (Vivienda)

Medida 18:	Vidrio de alto rendimiento térmico (Vivienda)
Categorización:	Edificación/ Consumo de energía/ Eficiencia energética
Categorización alternativa:	Edificación/ Consumo de energía
Tipo de medida:	Mitigación (Mejora de confort)
Descripción general: Aplicación a todo el stock de vivienda, incluyendo unidades residenciales existentes y nuevas. Se intervendrán 43,739 viviendas existentes y 7,877 viviendas nuevas, para un total de 51,616 viviendas. El stock de viviendas existentes se intervendrá en un periodo de 5 años (2021-2025). El stock de viviendas nuevas se intervendrá en un periodo de 3 años (2021-2023). No se tiene un impacto en la reducción de emisiones. Su principal efecto es sobre el confort térmico.	

Medida 18:	Vidrio de alto rendimiento térmico (Vivienda)
No se contemplan ahorros monetarios por cuenta de reducciones en el consumo. Se contemplan costos de implementación y *retrofit*. No hay costos por mantenimiento. Las especificaciones técnicas definen un vidrio con valor U de 3.12 W/m^2K y SHGC de 0.76	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	0
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	No aplica
Incertidumbre estimación:	Calificación 2 de 4 (Media) El desempeño y los costos se cuantificaron con información primaria o información secundaria proveniente de contextos similares en el país. Se simplifican o excluyen procesos de emisión y captura de carbono relevantes para la estimación del abatimiento total.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	• Edificación/ Procesos constructivos: 1,395.52
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Promotor, Constructor, Administración pública
Indirecto	Comunidad
Factibilidad	
Financiera	Calificación 1 de 3 (Baja) Costo por tonelada reducida menor al mayor valor del impuesto al carbono reportado a nivel mundial. Esta medida no contempla ahorros por reducción en el consumo de electricidad. Solo se tiene en cuenta el costo de implementación.
Técnica	Calificación 3 de 3 (Alta) Se cuenta con experiencia previa en el país para su construcción y mantenimiento.
Regulatoria	Calificación 3 de 3 (Alta) Existen elementos en las leyes y regulaciones vigentes que permiten su implementación. Resolución 549 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio por la cual se establecen los porcentajes de ahorro en agua y energía según clima y tipo de edificaciones: • Anexo 1 Guía de Construcción Sostenible • Protocolo de Implementación en la ciudad de Bogotá
Social	Calificación 3 de 3 (Alta) La medida puede tener una aceptación alta, mejora la calidad de vida y no genera riesgos para la población.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	• Empleo: Positivo • Salud: Positivo • Educación: Neutro

Medida 18:	Vidrio de alto rendimiento térmico (Vivienda)
	• Confort: Muy positivo (+0.42°C) • Crecimiento económico: Positivo • Productividad: Neutro

Tabla 128. Aislamiento térmico de losas de entrepiso (Vivienda)

Medida 19:	Aislamiento térmico de losas de entrepiso (Vivienda)
Categorización:	Edificación/ Consumo de energía/ Eficiencia energética
Categorización alternativa:	Edificación/ Consumo de energía
Tipo de medida:	Mitigación (Mejora de confort)
Descripción general: Aplicación a todo el stock de vivienda, incluyendo unidades residenciales existentes y nuevas. Se intervendrán 43,739 viviendas existentes y 7,877 viviendas nuevas, para un total de 51,616 viviendas. El stock de viviendas existentes se intervendrá en un periodo de 5 años (2021-2025). El stock de viviendas nuevas se intervendrá en un periodo de 3 años (2021-2023). No se tiene un impacto en la reducción de emisiones. Su principal efecto es sobre el confort térmico. No se contemplan ahorros monetarios por cuenta de reducciones en el consumo. Se contemplan costos de implementación y *retrofit*. No hay costos por mantenimiento. Las especificaciones técnicas definen un aislamiento con valor U de 0.45 W/m^2K.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	0
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	No aplica
Incertidumbre estimación:	Calificación 2 de 4 (Media) El desempeño y los costos se cuantificaron con información primaria o información secundaria proveniente de contextos similares en el país. Se simplifican o excluyen procesos de emisión y captura de carbono relevantes para la estimación del abatimiento total.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Promotor, Constructor, Administración pública
Indirecto	Comunidad
Factibilidad	
Financiera	Calificación 1 de 3 (Baja) Costo por tonelada reducida menor al mayor valor del impuesto al carbono reportado a nivel mundial. Esta medida no contempla ahorros por reducción en el consumo de electricidad. Solo se tiene en cuenta el costo de implementación.
Técnica	Calificación 3 de 3 (Alta) Se cuenta con experiencia previa en el país para su construcción y mantenimiento.
Regulatoria	Calificación 3 de 3 (Alta)

Medida 19:	Aislamiento térmico de losas de entrepiso (Vivienda)
	Existen elementos en las leyes y regulaciones vigentes que permiten su implementación. Resolución 549 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio por la cual se establecen los porcentajes de ahorro en agua y energía según clima y tipo de edificaciones: • Anexo 1 Guía de Construcción Sostenible • Protocolo de Implementación en la ciudad de Bogotá
Social	Calificación 3 de 3 (Alta) La medida puede tener una aceptación alta, mejora la calidad de vida y no genera riesgos para la población.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	• Empleo: Muy positivo • Salud: Positivo • Educación: Neutro • Confort: Positivo (+0.04°C) • Crecimiento económico: Positivo • Productividad: Neutro

Tabla 129. Sellamiento de infiltraciones (Vivienda)

Medida 20:	Sellamiento de infiltraciones (Vivienda)
Categorización:	Edificación/ Consumo de energía/ Eficiencia energética
Categorización alternativa:	Edificación/ Consumo de energía
Tipo de medida:	Mitigación (Mejora de confort)
Descripción general: Aplicación a todo el stock de vivienda, incluyendo unidades residenciales existentes y nuevas. Se intervendrán 43,739 viviendas existentes y 7,877 viviendas nuevas, para un total de 51,616 viviendas. El stock de viviendas existentes se intervendrá en un periodo de 5 años (2021-2025). El stock de viviendas nuevas se intervendrá en un periodo de 3 años (2021-2023). No se tiene un impacto en la reducción de emisiones. Su principal efecto es sobre el confort térmico. No se contemplan ahorros monetarios por cuenta de reducciones en el consumo. Se contemplan costos de implementación y *retrofit*. No hay costos por mantenimiento.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	0
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	No aplica
Incertidumbre estimación:	Calificación 2 de 4 (Media) El desempeño y los costos se cuantificaron con información primaria o información secundaria proveniente de contextos similares en el país. Se simplifican o excluyen procesos de emisión y captura de carbono relevantes para la estimación del abatimiento total.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA

Medida 20:	Sellamiento de infiltraciones (Vivienda)
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Promotor, Constructor, Administración pública
Indirecto	Comunidad
Factibilidad	
Financiera	Calificación 1 de 3 (Baja) Costo por tonelada reducida menor al mayor valor del impuesto al carbono reportado a nivel mundial. Esta medida no contempla ahorros por reducción en el consumo de electricidad. Solo se tiene en cuenta el costo de implementación.
Técnica	Calificación 3 de 3 (Alta) Se cuenta con experiencia previa en el país para su construcción y mantenimiento.
Regulatoria	Calificación 3 de 3 (Alta) Existen elementos en las leyes y regulaciones vigentes que permiten su implementación. Resolución 549 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio por la cual se establecen los porcentajes de ahorro en agua y energía según clima y tipo de edificaciones: • Anexo 1 Guía de Construcción Sostenible • Protocolo de Implementación en la ciudad de Bogotá
Social	Calificación 3 de 3 (Alta) La medida puede tener una aceptación alta, mejora la calidad de vida y no genera riesgos para la población.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	• Empleo: Neutro • Salud: Muy positivo • Educación: Neutro • Confort: Positivo (+0.32°C) • Crecimiento económico: Neutro • Productividad: Neutro

Adicionalmente, se analizó la implementación de controles de iluminación en áreas comunes y externas de edificaciones de vivienda.

Tabla 130. Control de iluminación (Vivienda)

Medida 21:	Control de iluminación (Vivienda)
Categorización:	Edificación/ Consumo de energía/ Eficiencia energética
Categorización alternativa:	Edificación/ Consumo de energía
Tipo de medida:	Mitigación
Descripción general: Instalación de controles de iluminación luz día en áreas comunes y externas. Se tiene un impacto en la reducción de emisiones por cuenta de la reducción en la demanda de electricidad. Se contemplan ahorros monetarios debido a la reducción en el consumo de electricidad (iluminación).	

Medida 21:	Control de iluminación (Vivienda)
Se contemplan costos de implementación y *retrofit*. No hay costos por mantenimiento. Las especificaciones técnicas definen la implementación en los pasillos de las edificaciones de vivienda.	
Adaptación	
Ahorro de agua potable (m^3):	NA
Reducción de temperatura (°C):	NA
Escorrentía regulada (m^3):	NA
Uso de fuentes alternativas de agua (m^3):	NA
Mitigación	
Mitigación (tCO_2-eq):	1,330.55
Costo-eficiencia (USD/tCO_2-eq):	358.03
Incertidumbre estimación:	3 (Alta) El desempeño y los costos se cuantificaron con información secundaria proveniente de contextos similares en el país. Se simplifican o excluyen procesos de emisión y captura de carbono relevantes para la estimación del abatimiento total.
Mitigación de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Incremento de emisiones de otros sectores (tCO_2-eq):	NA
Actores relevantes para la implementación de la medida	
Directo	Promotor, Constructor, Administración pública
Indirecto	Comunidad
Factibilidad	
Financiera	1 (Baja) Costo por tonelada reducida mayor a 30USD/tCO2-eq.
Técnica	3 (Alta) Se cuenta con experiencia previa en el país para su construcción y mantenimiento.
Regulatoria	3 (Alta) Existen elementos en las leyes y regulaciones vigentes que permiten su implementación. Resolución 549 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio por la cual se establecen los porcentajes de ahorro en agua y energía según clima y tipo de edificaciones: • Anexo 1 Guía de Construcción Sostenible • Protocolo de Implementación en la ciudad de Bogotá

Medida 21:	Control de iluminación (Vivienda)
Social	3 (Alta) La medida puede tener una aceptación alta, mejora la calidad de vida y no genera riesgos para la población.
Cobeneficios / Otros beneficios	
Sociales/Económicos/Ambientales/Otros	• Empleo: Positivo • Salud: Neutro • Educación: Positivo • Confort: Neutro • Crecimiento económico: Positivo • Productividad: Positivo

Si bien las fichas presentan un aumento promedio en la temperatura de las viviendas como cobeneficio de confort, a continuación, se profundiza un poco en el análisis de las temperaturas obtenidas de las simulaciones energéticas. De las simulaciones realizadas se obtiene la temperatura operativa media anual para cada unidad de vivienda modelada y la cantidad de horas en un año en las que la temperatura operativa se encuentra dentro de determinados intervalos. Con el valor de temperatura operativa media anual de todas las unidades de vivienda simuladas se realizó un ajuste a una distribución normal de probabilidad, para la cual se obtuvo una media de 18.69 °C y una desviación estándar de 0.94 °C. Al evaluar los resultados obtenidos a la luz de los valores definidos por el estándar ASHRAE 55-2017 para la temperatura anual promedio de Bogotá (13.46 °C), se obtiene que, bajo las condiciones simuladas, los habitantes de vivienda de interés social se encuentran dentro de las condiciones de confort del 80%. Lo anterior se muestra en la Figura 106.

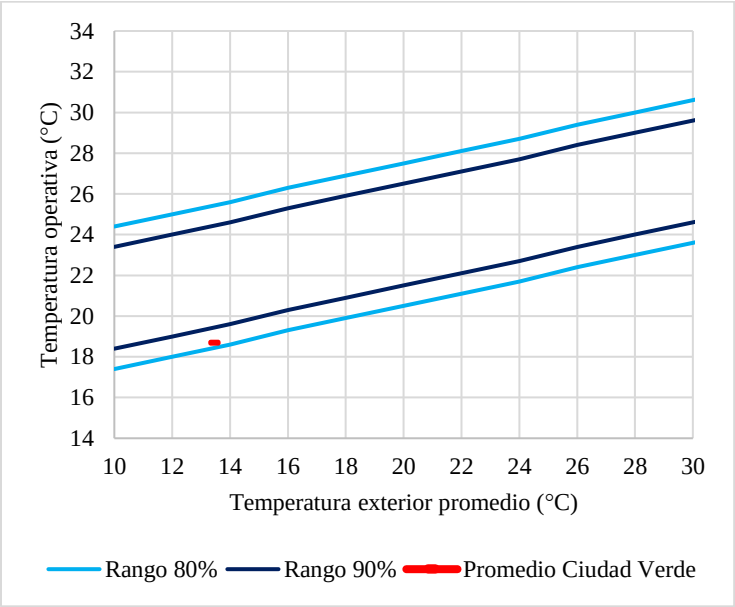


Figura 106. Evaluación del Modelo adaptativo en Ciudad Verde

Ahora bien, para los casos de mejora se contempla la implementación individual y agrupada en paquetes de las medidas pasivas previamente descritas. La Tabla 131 presenta los paquetes evaluados de medidas pasivas.

Tabla 131. Paquetes de medidas pasivas de mejora

Medidas de energía pasivas	**Paquete 1**	**Paquete 2**	**Paquete 3**	**Paquete 4**	**Paquete 5**	**Paquete 6**
Medida 1 Aumento proporción de vidrio en fachada	X	X	X			
Medida 2 Aislamiento del techo		X	X		X	X
Medida 3 Aislamiento térmico de paredes externas		X	X	X	X	X
Medida 4 Vidrio de alto rendimiento térmico			X	X		X
Medida 5 Aislamiento térmico de losas de entrepiso	X					
Medida 6 Sellamiento del 80% de las infiltraciones	X					

En la Figura 107 puede observarse como las dos mejores medidas a implementar son el aislamiento térmico de paredes externas y vidrio de alto rendimiento térmico, ya que presentan los mayores impactos en las condiciones de confort con aumentos aproximados en la temperatura de 0.92°C y 0.42°C, respectivamente.

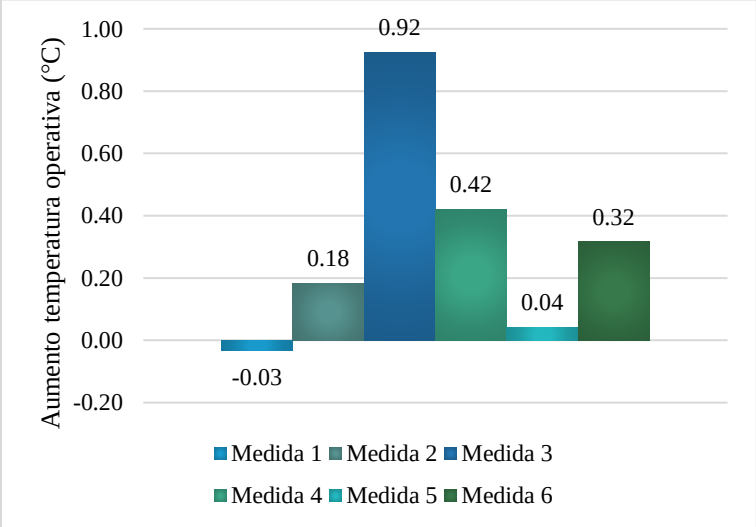


Figura 107. Aumentos de temperatura para cada medida pasiva individual

Asimismo, en la Figura 108 se observa que los paquetes 3 y 5 presentan los mayores impactos en las condiciones de confort con aumentos aproximados en la temperatura de 2.08°C y 1.96°C, respectivamente.

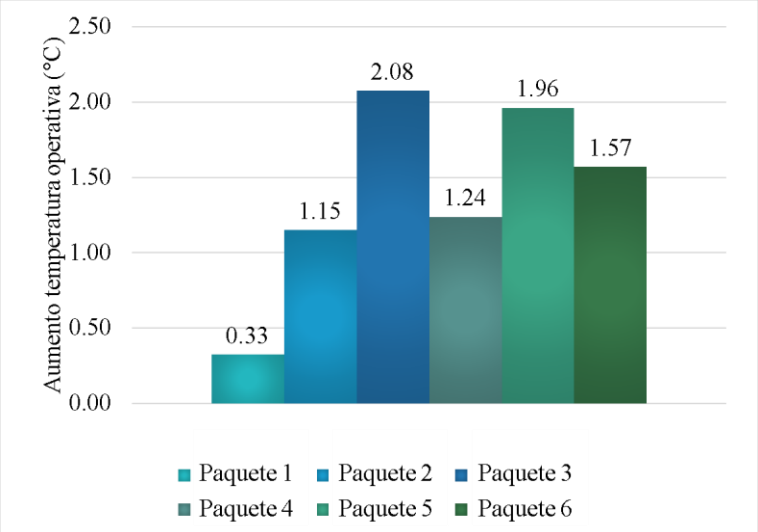


Figura 108. Aumentos de temperatura para cada paquete de medidas pasivas

En la Figura 109 se presenta la línea de emisiones para operación la operación de las viviendas bajo el escenario de confort, comparando la línea base de confort con las potenciales emisiones generadas al implementar las medidas pasivas que efectivamente generan un ahorro en el consumo por calefacción. Los resultados de la implementación de estas medidas pasivas agrupadas en paquetes se presentan en la Figura 110.

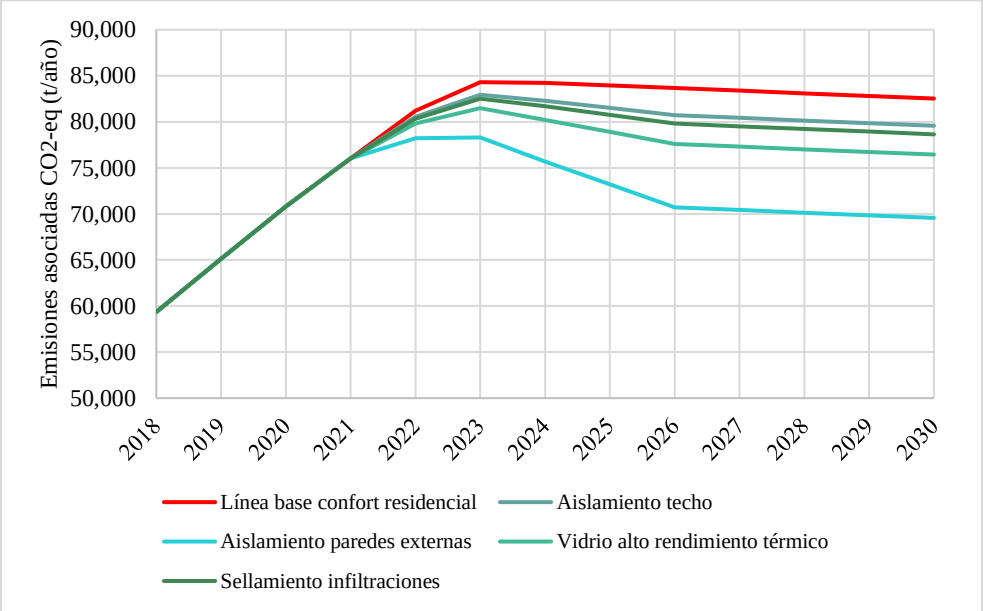


Figura 109. Mitigación de emisiones en sector residencial bajo escenario de confort por medida individual

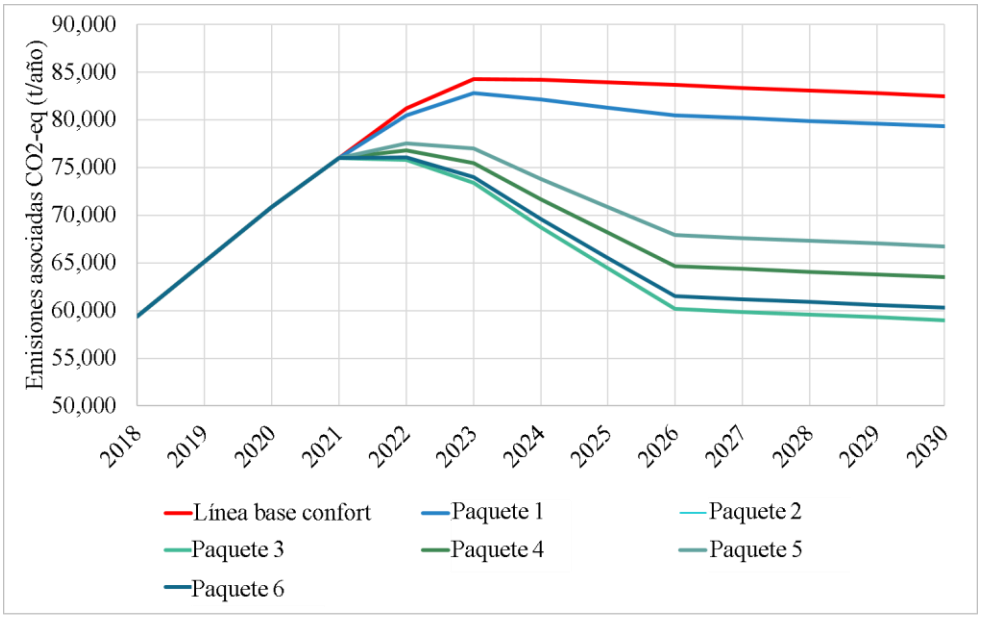


Figura 110. Mitigación de emisiones en sector residencial bajo escenario de confort por paquete

Asimismo, el potencial de abatimiento para el escenario de confort se muestra en la Figura 111 para el caso de implementación individual de las medidas. La Figura 112 presenta los abatimientos para el caso de implementación por paquetes.

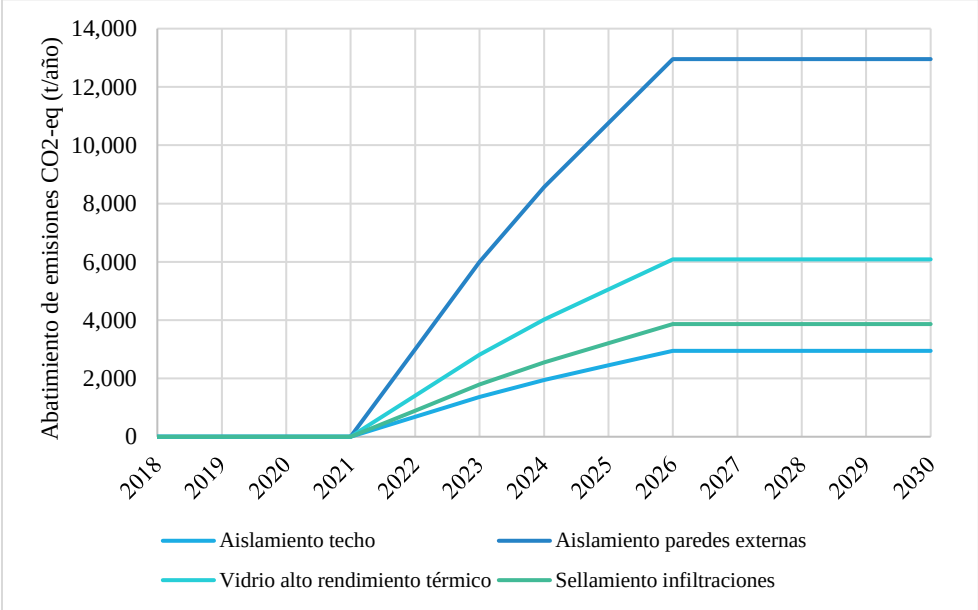


Figura 111. Potencial de abatimiento en sector residencial bajo escenario de confort por medida individual

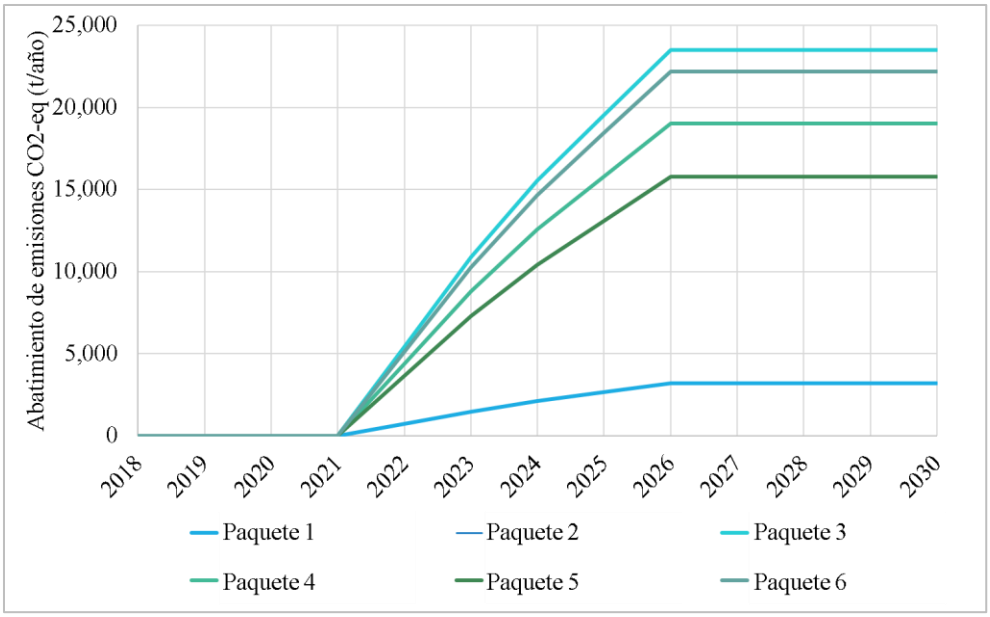


Figura 112. Potencial de abatimiento en sector residencial bajo escenario de confort por paquete

Los resultados de costo-eficiencia junto con el abatimiento de cada medida se presentan en una curva de costos marginales. En la Figura 113 puede observarse la curva en el caso de implementación individual de las medidas y la Figura 114 presenta los resultados en el caso de implementación por paquete. Como la línea base de confort incluye la implementación de calefacción, los costos asociados a este sistema mecanizado no se tienen en cuenta para el análisis de costo-eficiencia.

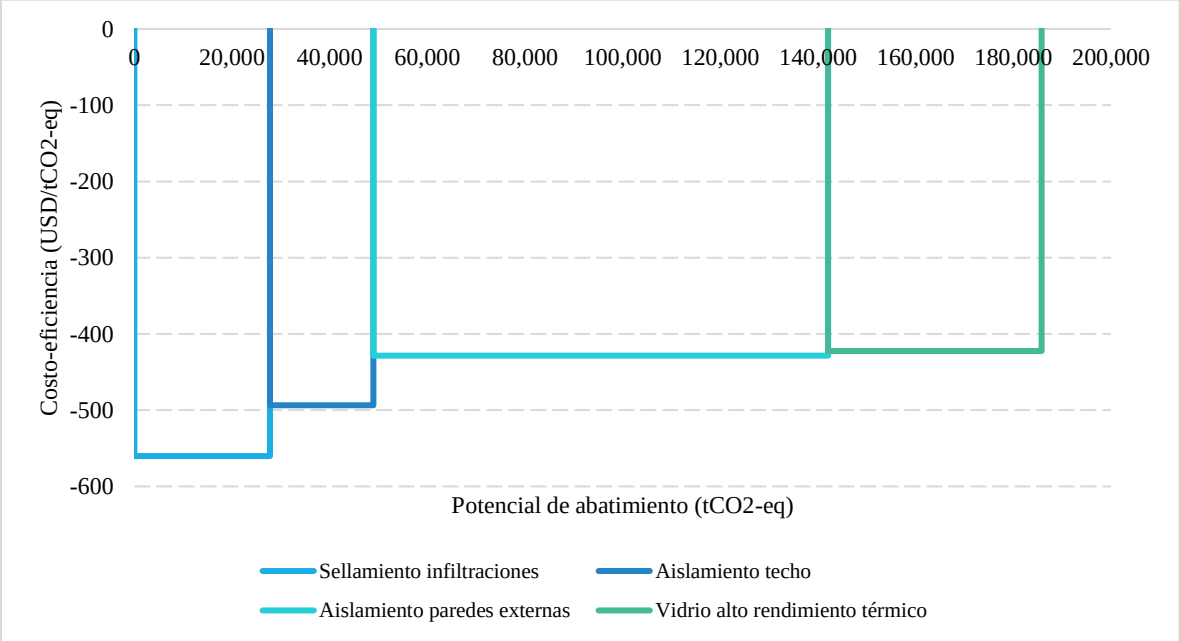


Figura 113. Curva de costos marginales de abatimiento para el sector residencial bajo escenario de confort por medida

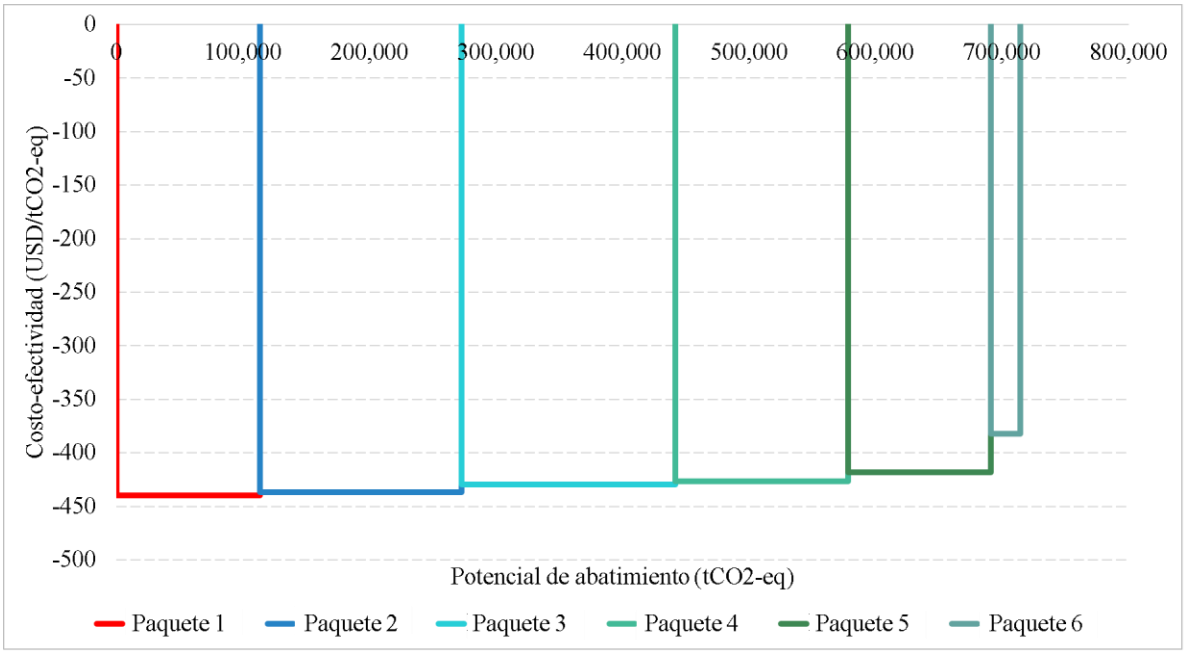


Figura 114. Curva de costos marginales de abatimiento para el sector residencial bajo escenario de confort por paquete

6.3.7. Resultados de la herramienta de integración para las opciones de mitigación

Se plantearon en total 47 medidas, sin embargo, se analizó un conjunto de 43 medidas en la herramienta de integración, las cuales en su mayoría corresponden al sector de infraestructura urbana (ver Tabla 132). Para la evaluación de las relaciones de traslapos y/o refuerzos se consideró que las medidas no podían adicionarse si esta relación era alta. Se identificó un traslapo alto entre ocho (8) de las medidas propuestas, en los sectores de residuos, agua e infraestructura urbana. Por ejemplo, para el sector de agua el traslapo entre "sistema de aprovechamiento de aguas lluvias" y "sistema de reúso de aguas grises" se clasificó como alto, debido a que el uso que se le puede dar a estas fuentes de agua es el mismo. A su vez, se estableció un traslapo medio entre nueve (9) de las medidas analizadas. Esto se observó, por ejemplo, para las medidas "instalación de bombillos led en los hogares" y "sistemas fotovoltaicos en conjuntos residenciales". Por último, se identificó un traslapo bajo entre seis de las (6) medidas, como "ducha ahorradora" y "precalentamiento de agua a través de colectores solares".

Por otro lado, no se observó un refuerzo alto entre ninguna de las medidas. Se estableció un refuerzo medio entre diez (10) de las medidas propuestas, por ejemplo, entre "vidrio de alto rendimiento térmico" y "aumento de la proporción de vidrio en la fachada exterior". Así mismo, se identificó un refuerzo bajo entre diez (10) de las medidas analizadas, como "calentadores de paso eléctrico" y "ducha ahorradora". Respecto a las relaciones de conflicto, estos se observaron entre algunas de las medidas propuestas por el sector de residuos. Particularmente, entre la medida "vehículos recolectores con bajas emisiones (biogás)" y las medidas "vehículos recolectores con bajas emisiones (biogás)", "compostaje descentralizado", "digestión anaerobia descentralizada" y "quema de metano generado en el relleno sanitario". Lo anterior debido a que, si los residuos generados en Ciudad Verde se disponen para la producción de biogás, estos no pueden ser gestionados mediante otros esquemas como el compostaje.

Como resultado del análisis de la relación entre las medidas se obtuvieron ocho (8) paquetes recomendados para el análisis conjunto de medidas y, a su vez, se identificaron cinco (5) conflictos. Esto permitió diferenciar 34 acciones independientes, que podían implementarse de manera simultánea y cuyo

efecto conjunto de abatimiento se podía aproximar a partir de una suma. Para las acciones no independientes se realizó una selección de acuerdo con los objetivos presentados en la Tabla 132. Para el análisis del escenario de mayor factibilidad se consideró que los distintos tipos de factibilidad tenían el mismo peso. En cuanto al escenario de mayor adaptación, se asignó un peso de 25% a los criterios de ahorro de agua potable, reducción de escorrentía y uso de fuentes alternativas de agua, y de 12.5% a reducción de temperatura superficial e incremento de evapotranspiración, dado que estos dos criterios se relacionan con temperatura. Por otro lado, para el Escenario 4 se descartaron las medidas en las que la costo-eficiencia era mayor a 5 USD/ton CO2eq -de acuerdo con el valor del impuesto al carbono en Colombia- lo cual redujo el total de medidas seleccionadas a 11. Adicionalmente, en el Escenario 6 se compararon 16 paquetes pertenecientes a los sectores de agua e infraestructura urbana. En estos se agruparon acciones relacionadas con el manejo de la escorrentía, el consumo de agua y energía, y procesos constructivos.

Tabla 132. Medidas seleccionadas por escenario

Escenario	Objetivo	Total	Agua	Ecología urbana	Infraestructura urbana	Energía	Residuos	Movilidad
Medidas propuestas	No aplica	43	3	2	27	2	6	3
Escenario 1	Mayor abatimiento	39	3	2	25	2	4	3
Escenario 2	Mejor costo-efectividad	39	3	2	25	2	4	3
Escenario 3	Mayor factibilidad	39	3	2	25	2	4	3
Escenario 4	Mayor abatimiento: limitado por costo-eficiencia	11	0	0	10	0	1	0
Escenario 5	Mayor adaptación	38	3	2	24	2	4	3
Escenario 6	Mayor abatimiento con paquetes disponibles	39	3	2	25	2	4	3

En general, las medidas escogidas para los distintos escenarios presentan características similares. Como se resume en la Figura 115 y en la Figura 116, la mayoría de las medidas se clasifican como acciones de mitigación y presentan una incertidumbre media en la estimación del efecto y de los costos. Gran parte de las medidas en la mayoría de los escenarios tienen una factibilidad financiera baja, lo que indica un costo mayor a 30 USD/ton $CO_{2\text{-eq}}$ y, por lo general, el número de medidas con factibilidad financiera alta se encuentra en un rango entre el 18% y el 29%. Esto indica que si bien la mayor parte de las medidas propuestas tienen costos que pueden impedir su implementación, en cada escenario fue posible identificar un porcentaje de medidas cuyos costos no son prohibitivos.

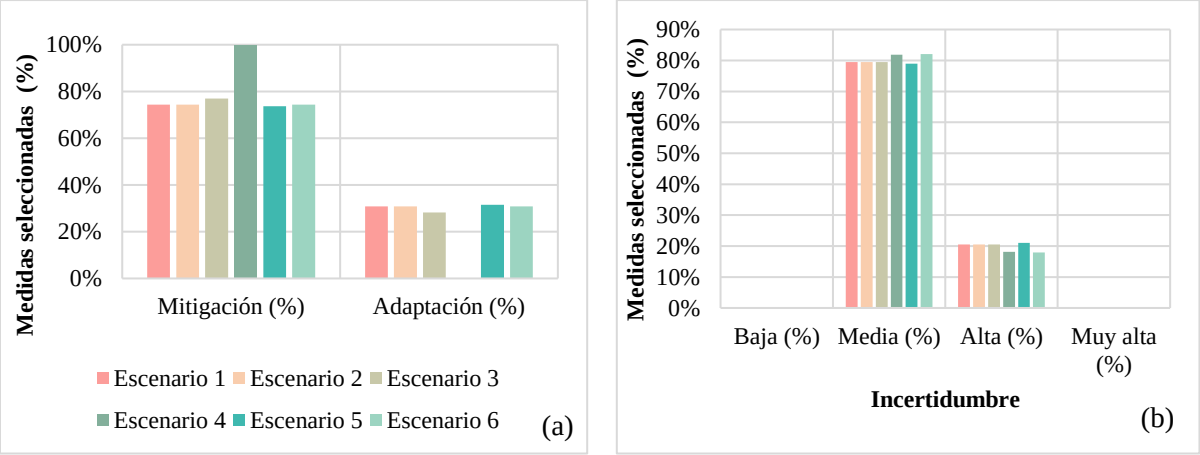


Figura 115. Características medidas seleccionadas: (a) Tipo de medida, y (b) incertidumbre

Las diferencias más notables se presentan en el Escenario 4, puesto que las medidas de adaptación son descartadas debido a su costo por tonelada abatida. A su vez, en este escenario hay una mayor proporción de medidas calificadas como altas en referencia a la factibilidad financiera, técnica, social y regulatoria. Lo anterior indica que, para el conjunto de medidas considerado, las medidas con mayor factibilidad financiera presentan una mayor factibilidad en todas las áreas analizadas. Por otro lado, en el escenario con paquetes se presenta una reducción en el porcentaje de medidas con factibilidad alta debido a que uno de los paquetes seleccionados corresponde al sistema de reúso de aguas grises y elementos para uso eficiente del agua. En este caso, el ahorro conjunto de agua no lleva a un ahorro equivalente a la inversión. A su vez, se considera que en lo concerniente a lo técnico, social y regulatorio la factibilidad es media. Ya a que a pesar de que hay prácticas domésticas de reúso de aguas grises, todavía no hay un uso extendido de sistemas para el tratamiento y reúso de aguas grises, ni regulaciones específicas sobre su desempeño.

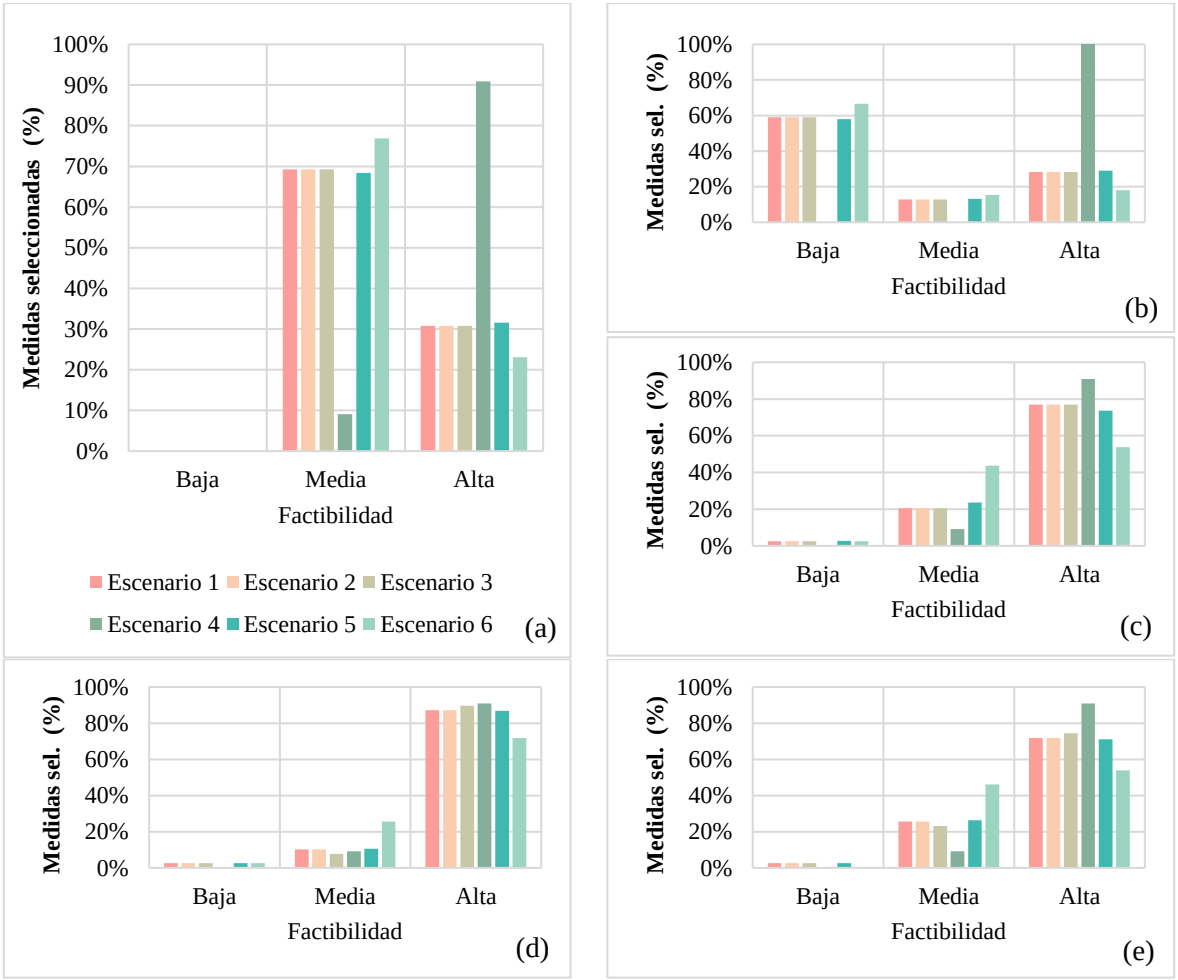


Figura 116. Factibilidad de medidas seleccionadas: (a) promedio, (b) factibilidad financiera, (c) factibilidad técnica, (d) factibilidad regulatoria, y (e) factibilidad social.

De manera similar, con excepción del Escenario 4, el potencial de mitigación presenta pocas variaciones en los escenarios evaluados (ver Figura 117). En general, la reducción de emisiones respecto a la línea base es cercana al 40% pero en el Escenario 4 este potencial es de 10.7%. A su vez, el potencial de reducción para el año 2030 es cercano al 71% para la mayoría de los escenarios y de 18.9% para el Escenario 4. Esta diferencia es menor a la diferencia que se presenta entre los costos estimados para los

escenarios, los cuales se resumen en la Figura 122 y la Figura 121. Por ejemplo, el valor presente de los costos totales del Escenario 4 es un 112% menor en comparación con el valor promedio de los otros escenarios y, en promedio, involucra una inversión inicial 93% menor. Adicionalmente, se prevén ahorros por tonelada abatida bajo la implementación de las medidas propuestas en el Escenario 4. Cabe anotar que los Escenarios 1 y 6, en los que se buscó el mayor abatimiento sin evaluar la costo-eficiencia de las medidas, presentan la mayor proporción de acciones con factibilidad financiera baja. Por lo que un mayor abatimiento está asociado con inversiones más altas pero la inversión no se refleja de manera proporcional en la reducción de emisiones.

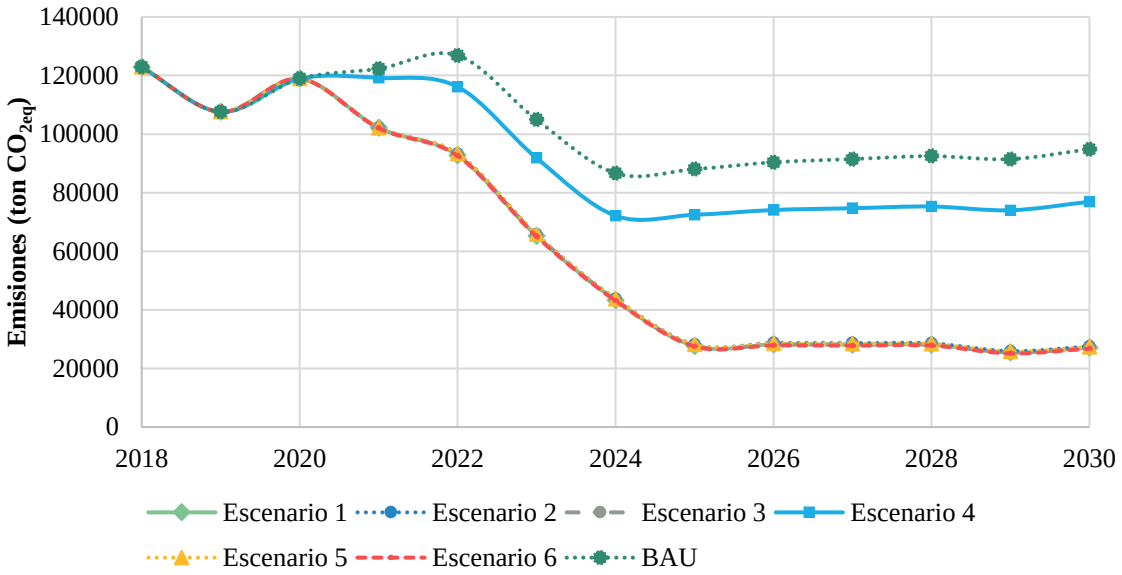


Figura 117. Curvas de emisiones en los diferentes escenarios

En la Figura 118 se presentan las emisiones per cápita de acuerdo con la población proyectada. Se prevé que las medidas propuestas entre los años 2021 a 2024 para todos los escenarios, con excepción del Escenario 4, lleven a que las emisiones en el año 2024 sean 0.25 ton CO_{2eq} / per cápita. A su vez, la implementación de las medidas de los distintos escenarios daría como resultado que las emisiones en el año 2030 sean alrededor de 0.17 a 0.48 ton CO_{2eq} / per cápita. Adicionalmente, entre los años 2025 a 2030 se evidencia una trayectoria para el Escenario 4 en el que la tasa de crecimiento de las emisiones per cápita es similar a la de la línea base, la cual es aproximadamente de 3% anual. En contraste en los otros escenarios, esta tasa es en promedio de 0.8 a 1%.

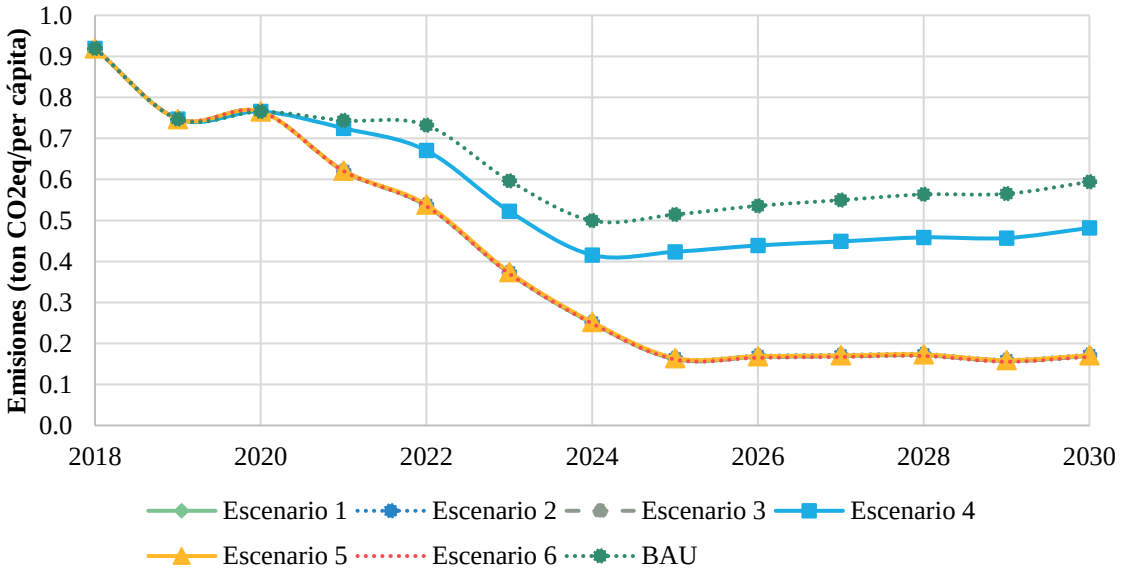


Figura 118. Curvas de emisiones per cápita en los diferentes escenarios

El potencial de mitigación por sector, en los diferentes escenarios, para la clasificación principal se presenta en la Figura 119. En relación con el sector de infraestructura urbana, la reducción de emisiones respecto a su línea base es, en promedio, del 34% para los diferentes escenarios excepto para el Escenario 4, en el cual es del 13%. El potencial de mitigación más alto se observa en el subsector consumo de energía (i.e., 40%), por el contrario, el subsector de procesos constructivos presenta un potencial de mitigación de emisiones del 5%. La medida que genera el mayor abatimiento de emisiones es la estufa de inducción. Aun así, esta medida no se selecciona en el Escenario 4 (i.e., limitado por costo-eficiencia) por sus altos costos de operación. A su vez, las medidas que generan abatimiento en el subsector consumo de agua se seleccionan en el escenario de mayor costo-efectividad y en el de adaptación. Por otro lado, en el sector de energía se observa que el potencial de abatimiento no presenta variaciones en los escenarios evaluados excepto en el Escenario 4, en el cual ninguna de las medidas planteadas se selecciona debido al costo. En promedio, se abaten 9,443.11 $tCO_{2\text{-}eq}$ por la implementación de las medidas para todos los escenarios excepto el Escenario 1 y el Escenario 4. Particularmente, en el Escenario 1 el abatimiento es ligeramente mayor (i.e., 9939.53 $tCO_{2\text{-}eq}$) debido a la selección de una medida del sector de residuos que contribuye a la generación de energía.

De acuerdo con los resultados obtenidos para el sector de residuos, la reducción de emisiones respecto a su línea base es, en promedio, del 71% para los diferentes escenarios excepto para el Escenario 4, en el cual es del 44%. El potencial de mitigación más alto se observa en el subsector gestión de residuos (i.e., 103%). A su vez, el subsector de consumo de energía presenta un potencial de mitigación de emisiones del 71%. La medida que genera el mayor abatimiento de emisiones es la quema de metano generado en el relleno sanitario, la cual es la única seleccionada en el Escenario 4. Sin embargo, esta medida genera impactos ambientales negativos que están asociados a la disposición de los residuos en los rellenos sanitarios. Para el sector de movilidad, la reducción de emisiones respecto a su línea base es, en promedio, del 41% para los diferentes escenarios. Las medidas propuestas para este sector se seleccionan en todos los escenarios excepto en el 4, por lo que no se observan grandes diferencias en el potencial de abatimiento. Para el sector del agua, la reducción de emisiones respecto a su línea base es, en promedio, del 19%, 23%, 12% y 24% para el Escenario 1 y 2, Escenario 3, Escenario 4 y el Escenario 5 y 6, respectivamente. El potencial de mitigación más alto se observa en los subsectores suministro del agua (i.e., 23%) y manejo de la escorrentía (22%). Se observa que las medidas planteadas para este sector generan mayores beneficios en la adaptación que en la mitigación al cambio climático. Por último, en el

sector de ecología urbana, el potencial de abatimiento no presenta variaciones en los escenarios evaluados excepto en el Escenario 4, en el cual ninguna de las medidas planteadas se selecciona debido al costo. En promedio, se abaten 1,698.81 $tCO_{2\text{-}eq}$ por la implementación de las medidas en todos los escenarios excepto en el 4.

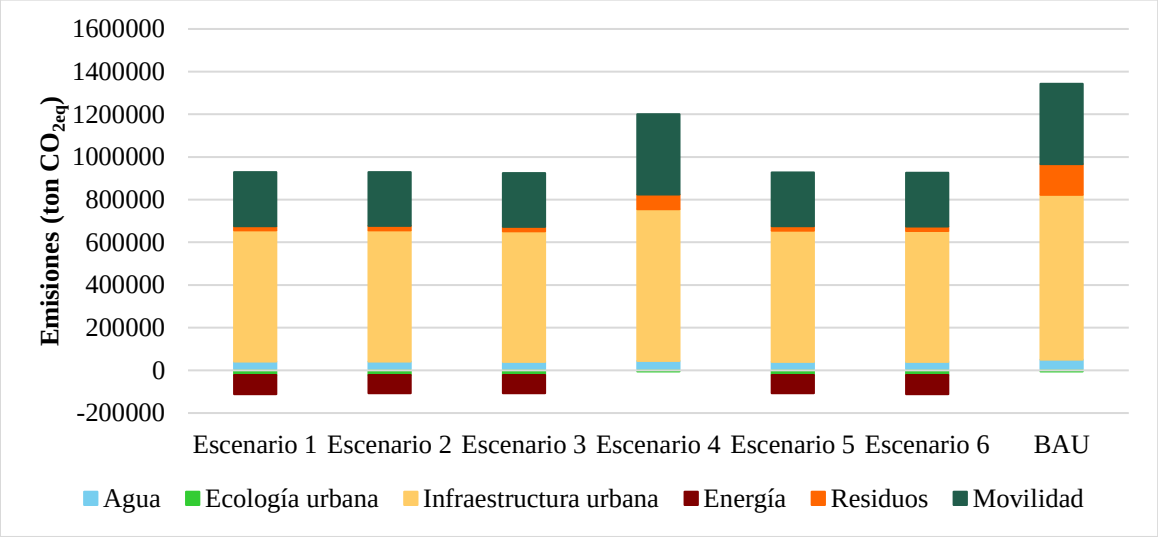


Figura 119. Emisiones por sector para los diferentes escenarios (clasificación principal)

Por otro lado, el potencial de mitigación por sector, en los diferentes escenarios, para la clasificación alternativa se presenta en la Figura 120. En relación con el sector de energía, la reducción de emisiones respecto a su línea base es, en promedio, del 51% para los diferentes escenarios excepto para el Escenario 4 y el Escenario 6, en los cuales es del 9% y del 52%, respectivamente. En el sector IPPU la reducción de emisiones respecto a su línea base es, en promedio, del 5% para los diferentes escenarios excepto para el Escenario 4, en el cual es del 4%. A su vez, en el sector AFOLU se abaten en promedio 1,698.81 $tCO_{2\text{-}eq}$ por la implementación de las medidas en todos los escenarios excepto en el 4. En el sector de residuos se observa que la reducción de emisiones respecto a su línea base es, en promedio, del 87% para los diferentes escenarios excepto para el Escenario 4, en el cual es del 57%.

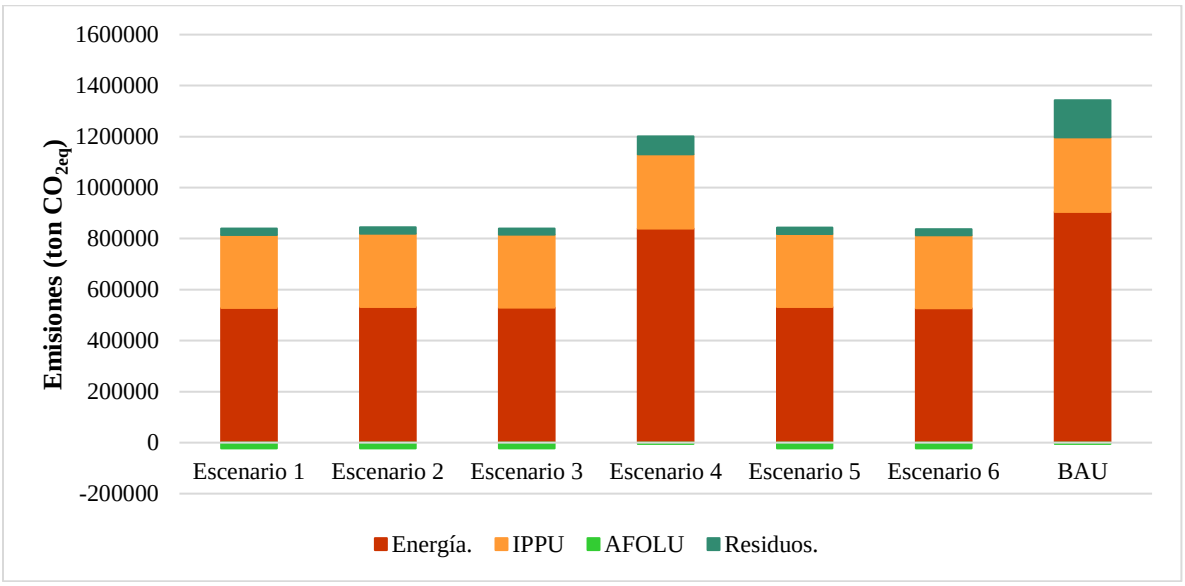


Figura 120. Emisiones por sector para los diferentes escenarios (clasificación alternativa)

Los Escenarios 5 y 6 tienen mayores costos dado que incluyen la implementación de sistemas para el reúso de aguas grises en viviendas. Esta medida es seleccionada en el Escenario 5 debido a que integra el uso de fuentes alternativas de agua, lo cual contribuye a la adaptación. Así mismo, en el Escenario 6 hace parte de un paquete que presenta un mayor potencial de abatimiento en comparación con otro de los paquetes propuestos que involucra medidas similares para el ahorro de agua potable. No obstante, no hay una mayor reducción de emisiones y beneficios monetarios adicionales debido a aspectos particulares del caso de estudio, puesto que actualmente existe un uso de aguas grises que se refleja en ahorro de potable, pero en el que no se emplea un sistema para tratar el agua y, por lo tanto, depende de hábitos individuales para el almacenamiento y uso posterior del agua. En consecuencia, esta medida presenta posibles cobeneficios sociales asociados con el acceso al agua cuyo impacto no se traduce necesariamente a términos monetarios.

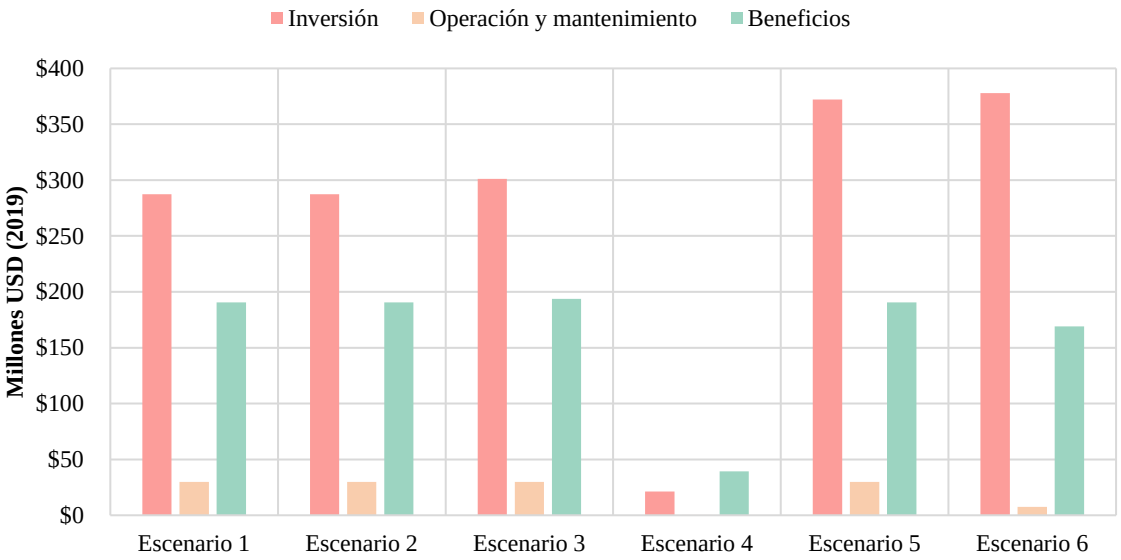


Figura 121. VPN costos y beneficios

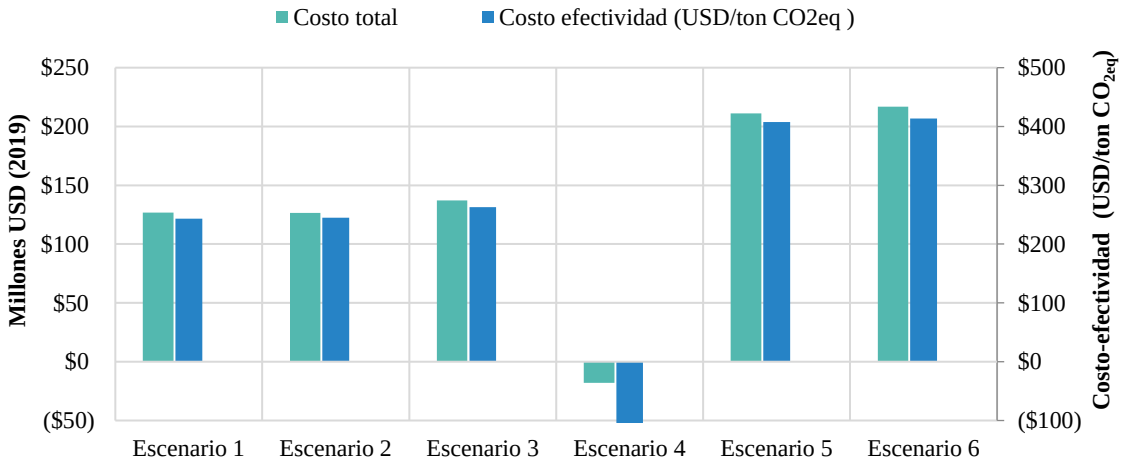


Figura 122. VPN Costos totales y costo-efectividad

Los cinco indicadores propuestos para analizar la contribución de las medidas en el incremento de la resiliencia frente a posibles problemas de desabastecimiento, inundaciones e incremento de la temperatura se resumen en la Figura 123. Los resultados indican importantes ahorros de agua potable, sin embargo, el uso de fuentes alternativas de agua y escorrentía regulada son comparativamente menores. Estos tres

indicadores están principalmente asociados con medidas del manejo de la escorrentía y el consumo de agua, las cuales hacen parte del sector agua e infraestructura urbana respectivamente.

Los aportes por ahorro en agua potable están principalmente representados por el uso de equipos eficientes y sistemas de reúso y aprovechamiento en unidades residenciales. El escenario 3 exhiben los mayores volúmenes de agua ahorrada por la inclusión de medidas asociadas con nuevas tecnologías como lavadoras eficientes. El uso de fuentes de agua alternativas depende en gran medida de la implementación de tipologías SUDS y sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias en unidades residenciales, pues el agua recuperada de estos sistemas puede ser utilizada en usos no potables. Ahora bien, el incremento observado en el escenario 5 y 6 para este indicador se debe a un aumento en las medidas consideradas en el consumo de agua. Por su parte, los resultados en la escorrentía regulada indican que los SUDS exhiben un potencial en la reducción del agua lluvia descargar al sistema de drenaje por los procesos de infiltración y evapotranspiración que allí se presenta. Sin embargo, en los dos primeros escenarios, los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias representan un porcentaje importante del total de escorrentía regulada en comparación con los SUDS. En el escenario 4 solo se observan contribuciones por ahorro de agua potable por medidas de consumo de agua como la implementación de duchas ahorradoras y lavaplatos con aireador.

Por otro lado, no se observan variaciones en los indicadores relacionados con la regulación de temperatura entre escenarios. La máxima reducción de temperatura superficial reportada es de aproximadamente 8 °C, la cual se encuentra dentro de las medidas asociadas con la cobertura del suelo pertenecientes al sector de ecología urbana. Esta reducción depende principalmente de un análisis en la temperatura superficial de las coberturas presentes en Ciudad Verde e indica de manera indirecta la incidencia de las zonas verdes y cuerpos de agua en la temperatura ambiental. Ahora bien, el aumento en la evapotranspiración, el cual hace parte de las medidas del manejo de la escorrentía, manifiesta un potencial en la reducción de la temperatura por la implementación de tipologías SUDS. Esto se debe a que los procesos de evapotranspiración requieren energía, la cual es obtenida del ambiente y como consecuencia se observa una disminución de temperatura ambiental. A pesar de que el efecto global en Ciudad Verde es bajo, localmente puede llegar a ser relevante.

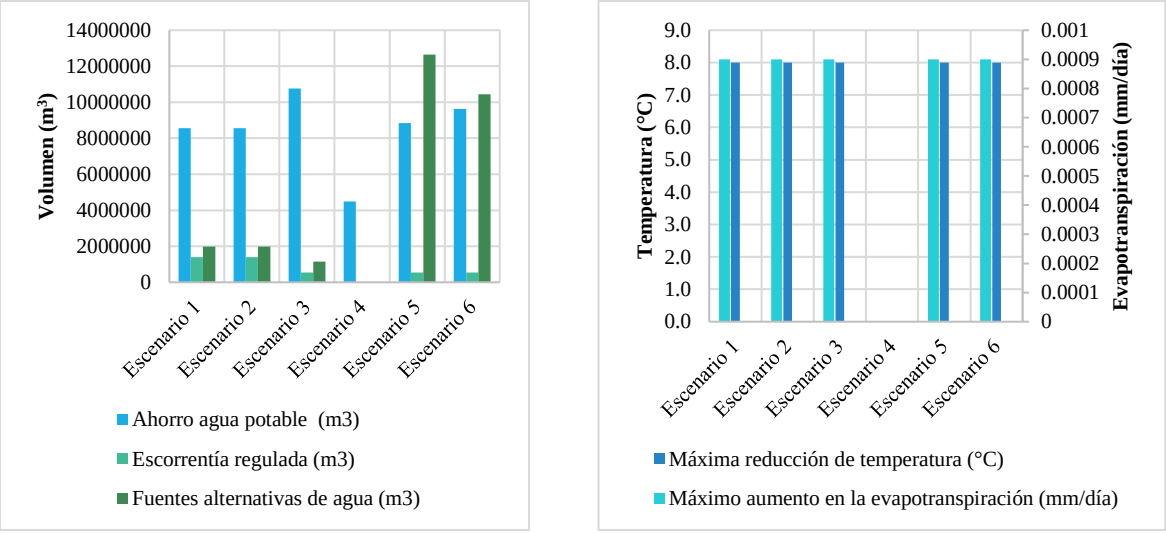


Figura 123. Indicadores referentes a la adaptación al cambio climático

En la Figura 124 se presentan los resultados obtenidos de las cuatro categorías de cobeneficios u otros beneficios definidas para cada escenario de análisis. En general, las medidas seleccionadas exhiben efectos dentro de rangos neutros y positivos sobre los beneficios considerados. Algunos beneficios como

salud, educación y oferta de recursos naturales presentan efectos comparativamente más positivos para la mayoría de los escenarios, por la ejecución de las medidas seleccionadas. Aunque el beneficio asociado con la disminución del ruido fue el único que presentó efectos negativos por medidas asociadas con la gestión de residuos, particularmente en el escenario 4 (i.e., mayor abatimiento: limitado por costo-eficiencia), puede considerarse neutro. Por su parte, los beneficios ambientales fueron los que menor efecto positivo demostraron con respecto a las demás categorías. El beneficio social asociado con la seguridad alimentaria es considerado principalmente neutro ya que solo una medida de las seleccionadas manifestó un efecto positivo sobre el mismo, por lo tanto, no se presenta en la Figura 124. Por cada beneficio se observa poca variación de los resultados entre escenarios, sin embargo, el escenario 4 suele presentar efectos menos positivos que los demás.

Las principales medidas que manifiestan efectos positivos en los beneficios a la salud están asociadas con el incremento y restauración de coberturas vegetales, reducción en emisiones y regulación en la temperatura de las unidades residenciales. Medidas como la implementación de tipologías SUDS y sistemas de reúso de aguas lluvias, restauración ecológica de zonas verdes y acciones asociadas con el aprovechamiento de residuos y eficiencia energética indican efectos positivos en educación. En relación con la oferta de recursos naturales como beneficio económico, acciones encaminadas hacia el incremento de las coberturas vegetales por restauración ecológica e implementación SUDS, así como el uso de sistemas de energías descarbonizadas exhiben efectos muy positivos. En general los beneficios ambientales son neutros, sin embargo, medidas como la restauración de coberturas vegetales, implementación de SUDS, uso de fuentes de energía descarbonizadas, aprovechamiento de residuos y la implementación de nuevas tecnologías en términos de movilidad muestran impactos positivos en la calidad del aire, agua, suelo y biodiversidad.

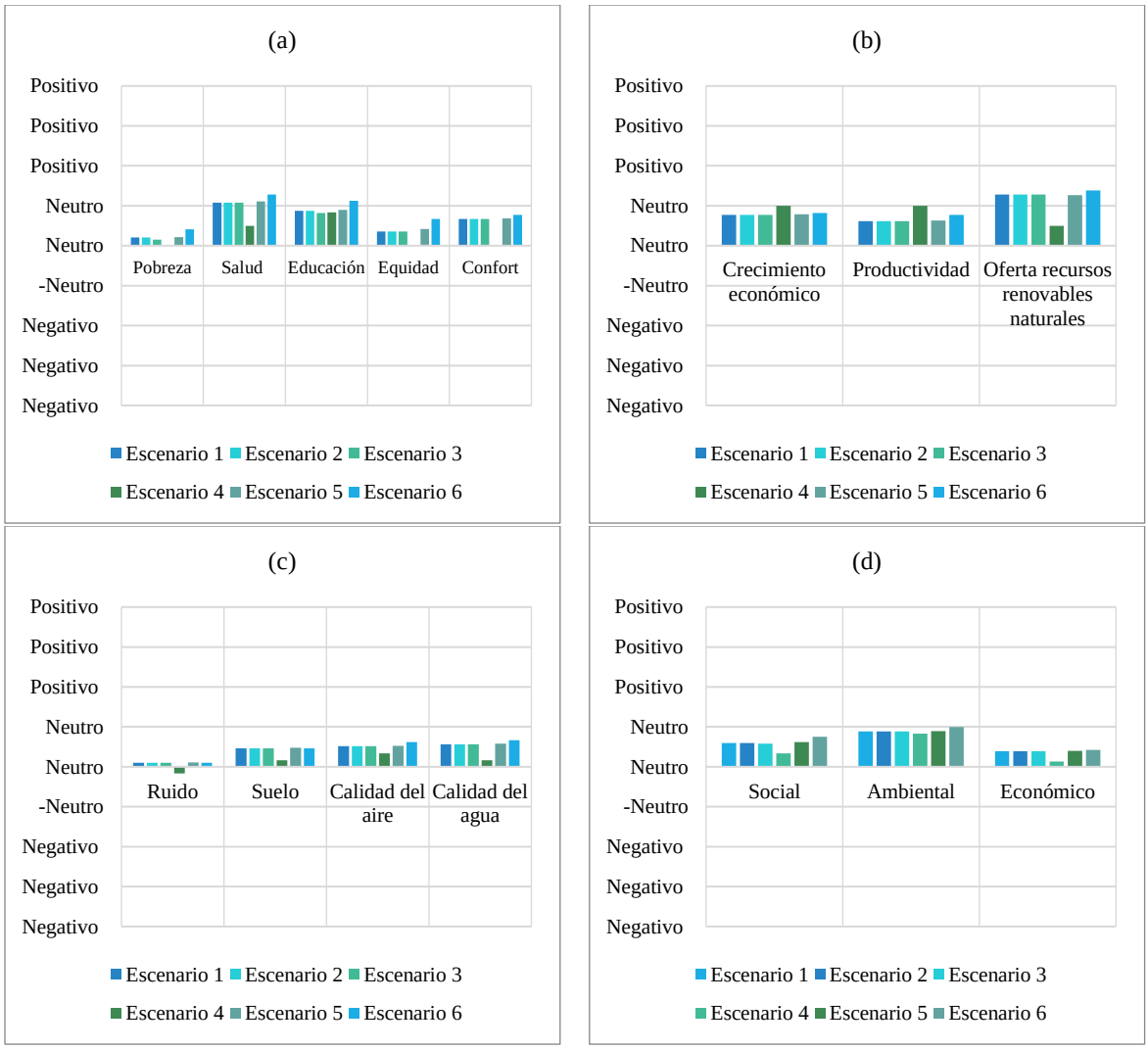


Figura 124. Cobeneficios determinados para cada escenario de análisis: (a) beneficios sociales, (b) beneficios económicos, (c) beneficios ambientales y (d) otros beneficios.

Referencias

[1] Secretaría de Planeación y Ordenamiento Territorial, "Plan de Ordenamiento Territorial de Soacha," p. 422, 2017.

[2] A. Church, R. Fish, R. Haines-Young, S. Mourato, and T. Jamie, "UK National Ecosystem Assessment Follow-on. Work Package Report 5: Cultural ecosystem services and indicators. UNEP-WCMC, LWEC, UK." .

[3] IPCC, "Metodologías Genéricas Aplicables a Múltiples," *Directrices del IPCC 2006 para los Inventar. Nac. Gases Ef. Invernadero Vol. 4 Agric. Silvic. y Otros Usos la Tierra.*, pp. 1–66, 2006.

[4] Aalde et al., "Tierras Forestales," *Directrices del IPCC 2006 para los Inventar. Nac. gases Ef. invernadero*, vol. 4, pp. 1–93, 2006.

[5] T. Matching and R. Test, "2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelnes form National Greenhouse Gas Inventories," *Test*, pp. 162–173, 2001.

[6] Observatorio Ambiental de Bogotá, "Consumo residencial de agua por habitante - CRAPH," 2018. .

[7] M. del C. Santana, J. F. Bonilla Tovar, and C. A. Castillo Sotomayor, “Rango de Consumo - Básico,” 2015.
[8] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), “Encuesta multipropósito (EM) 2017,” 2017. .
[9] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), “Encuesta Nacional de Presupuestos de los Hogares (ENPH),” 2017. .
[10] D. Butler and J. W. Davies, *Urban Drainage*, Segunda., vol. 53, no. 9. Londres: Taylor & Francis, 2004.
[11] C. y territorio Ministerio de Vivienda, “Título D - Sistemas de Recolección y Evacuación de Aguas Residuales Domésticas y Aguas Lluvias,” 2016. .
[12] L. W. Mays, *Stormwater Collection Systems Design Handbook*. New York: McGraw-Hill, 2001.
[13] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), “Acuerdo 43 del 2006,” 2010.
[14] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), “Adecuación Hidráulica y Recuperación Ambiental Río Bogotá,” 2009.
[15] Empresa de Acueducto Alcantarillado y Aseo de Bogotá (EAB), “Sistema Chingaza.” .
[16] Empresa de Acueducto Alcantarillado y Aseo de Bogotá (EAB), “Informe hídrico. Relación mensual de agua captada y suministrada en plantas de tratamiento año 2018,” Bogotá D.C., 2018.
[17] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, “Boletín del índice de calidad del agua en conrrientes superficiales ‘ICA’ 2018 - II,” 2013. .
[18] M. N. Torres, J. E. Fontecha, Z. Zhu, J. L. Walteros, and J. P. Rodríguez, “A participatory approach based on stochastic optimization for the spatial allocation of Sustainable Urban Drainage Systems for rainwater harvesting.,” *Environ. Model. Softw.*, vol. 123, no. August 2018, p. 104532, 2020.
[19] International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, “SOLID AND INDUSTRIAL HAZARDOUS WASTE MANAGEMENT ASSESSMENT,” Washington, DC, 2018.
[20] Alcaldía de Soacha, “INFORME RESULTADOS CENSO PRO 2019,” 2019.
[21] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, “Evaluación Integral De Prestadores Aseo Internacional S.A. E.S.P.,” Bogotá D.C., 2019.
[22] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, “INFORME DE SEGUIMIENTO A SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL NUEVO MONDOÑEDO S.A E.S.P.,” 2019.
[23] Aseo Internacional S.A. E.S.P., “PROGRAMA PARA LA PRESTACIÓN DEL SERVICIO PÚBLICO DE ASEO EN EL MUNICIPIO DE SOACHA,” 2018.
[24] CONSORCIO PGIRS SOACHA, “Tomo 1,” in *ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS PGIRS PARA EL MUNICIPIO DE SOACHA DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA*, 2015.
[25] D. Hoornweg and P. Bhada-Tata, “WHAT A WASTE A Global Review of Solid Waste Management,” 2012.
[26] L. Donoso and Alcaldía Municipal de Chía, “Residuos Sólidos Aprovechables,” 2015.
[27] Departamento Nacional de Planeación, “CONPES 3918 ESTRATEGIA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS) EN COLOMBIA.” DNP, Bogotá, 2018.
[28] Amarilo, “Informe de sostenibilidad Colombia 2017,” 2017.
[29] Tecnalia, “Estudio en la intensidadde utilización dematerialesy economía circularen Colombia para la Misión de Crecimiento Verde. Producto 1.,” 2017.
[30] Departamento Nacional de Planeación, “PÉRDIDA Y DESPERDICIO DE ALIMENTOS EN COLOMBIA Estudio de la Dirección de Seguimiento y Evaluación de Políticas Públicas.” Bogotá, p. 48, 2016.
[31] Naciones Unidas, “La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe.” Santiago, 2018.
[32] Comisión para la Cooperación Ambiental, “Caracterización y gestión de la pérdida y el

desperdicio de alimentos en América del Norte, informe sintético," Montreal, 2017.
[33] C. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, "Segundo Reporte Bienal de Actualización Segundo Reporte Bienal de Actualización," p. 180, 2018.
[34] ANSI, "ASHRAE Standard 55 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy," 2017. .
[35] CBE, "Thermal Comfort Tool," 2019. .
[36] D. Departamento Administrativo Nacional de Estadística, "CENSO NACIONAL DE POBLACIÓN Y VIVIENDA 2018," 2019.
[37] I. Losada Rodríguez *et al.*, "Guía Metodológica Iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles," 2011.
[38] UPME and C. Corpoema-cusa, "Caracterización energética del sector residencial urbano y rural en Colombia. Volúmen 2: Caracterización por Piso Térmico," 2012.
[39] UPME-Ecoingeniería, "Determinación de propiedades físicas y, estimación del consumo energético de la producción, de acero, concreto, vidrio, ladrillo y otros materiales, entre ellos los alternativos y otros de uso no tradicional, utilizados en la construcción de edificaciones." 2012.
[40] J. D. García López and F. Stand Villarreal, "Comparación de los principales sistemas constructivos de VIS en Colombia, desde una perspectiva de sostenibilidad, empleando BIM: caso estudio en Soacha," 2016.
[41] N. C. Kayaçetin and A. M. Tanyer, "Embodied carbon assessment of residential housing at urban scale," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 117, p. 109470, Jan. 2020.
[42] BRE Enviromental Assesment Method, "BREEAM Uk New Construction non-domestic buildings thechnical manual. Standards for transport: proximity to amenities," 2016. .
[43] NAPA, "Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage." 2018.
[44] M. R. Pouranian and M. Shishehbor, "Sustainability assessment of green asphalt mixtures: A review," *Environ. - MDPI*, vol. 6, no. 6, Jun. 2019.
[45] S. Pantini, G. Borghi, and L. Rigamonti, "Towards resource-efficient management of asphalt waste in Lombardy region (Italy): Identification of effective strategies based on the LCA methodology," *Waste Manag.*, vol. 80, pp. 423–434, Oct. 2018.
[46] Unidad de Planeación Minero Energética, "Plan Energetico Nacional 2020-2050," 2020.
[47] Ministerio de Hacienda, "Marco Fiscal de Mediano Plazo. 2019," p. 561, 2019.
[48] J. Jenkins, H. Ginzo, S. M. Ogle, and L. Verchot, "Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios de gases de efecto invernadero. Capítulo 8. ASENTAMIENTOS," pp. 1–34, 2006.
[49] S. M. Ogle *et al.*, "2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Inventories. Chapter 2: Generic Methodologies Applicable To Multiple Land-Use Categories," 2019.
[50] Á. Cadena *et al.*, "Estimación de curva de costos abatimiento de emisiones gases efecto invernadero sector vivienda urbana en Colombia." 2012.
[51] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), "Calculadora de emisiones," 2016. .
[52] Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, *Reglamento Técnico Del Sector De Agua Potable Y Saneamiento Básico Ras. Título B. Sistemas de Acueducto*. 2010.
[53] Sistema único de información de servicios públicos domiciliarios, "Indicadores Comerciales," 2019.
[54] Sistema único de información de servicios públicos domiciliarios, "Sistemas de Abastecimiento," 2019.
[55] G. Venkatesh, J. Hammervold, and H. Brattebø, "Combined MFA-LCA for analysis of wastewater pipeline networks: Case study of Oslo, Norway," *J. Ind. Ecol.*, vol. 13, no. 4, pp. 532–550, 2009.
[56] ECOINGENIERÍA S.A.S, "Determinación de propiedades físicas y estimación del consumo energético en la producción de acero, concreto, vidrio, ladrillo y otros materiales, entre ellos los alternativos y otros de uso no tradicional, utilizados en la construcción de edificaciones c," Cali, 2012.

[57] V. Kaushik, S. Jalalediny, and M. Najafi, “Comparison of Life Cycle Carbon Footprints of Steel and Concrete Pressure Pipes,” *Pipelines*, pp. 64–74, 2019.
[58] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), “Factores de emisión del sistema interconectado nacional Colombia-SIN.” Bogotá D.C., 2017.
[59] Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAB-ESP), “Reportes de operación Plantas de Tratamiento de Agua Potable,” 2017.
[60] D. Kyung, D. Kim, S. Yi, W. Choi, and W. Lee, “Estimation of greenhouse gas emissions from sewer pipeline system,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, no. 12, pp. 1901–1911, 2017.
[61] E. Vahidi, E. Jin, M. Das, M. Singh, and F. Zhao, “Environmental life cycle analysis of pipe materials for sewer systems,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 27, pp. 167–174, 2016.
[62] D. Bartram *et al.*, “Chapter 6 wastewater treatment and discharge. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories,” in *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 2019.
[63] El Espectador, “CAR: atada a la construcción de la PTAR Canoas,” 2019. .
[64] Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAB-ESP), “Informes de actividades PTAR Salitre,” 2019. .
[65] CDM Smith & INGESAM, “Estudio de Impacto Ambiental Canoas,” Bogotá D.C., 2016.
[66] J. Huang, B. Mendoza, J. S. Daniel, C. J. Nielsen, L. Rotstayn, and O. Wild, “Anthropogenic and natural radiative forcing,” *Clim. Chang. 2013 Phys. Sci. Basis Work. Gr. I Contrib. to Fifth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Chang.*, vol. 9781107057, pp. 659–740, 2013.
[67] Alcaldía Mayor de Bogotá, “Etapa de formulación. Revisión general Plan de Ordenamiento Territorial,” Bogotá D.C., 2019.
[68] M. García-Sánchez and L. P. Güereca, “Environmental and social life cycle assessment of urban water systems: The case of Mexico City,” *Sci. Total Environ.*, vol. 693, p. 133464, 2019.
[69] K. Smith, S. Liu, and T. Chang, “Contribution of Urban Water Supply to Greenhouse Gas Emissions in China,” *J. Ind. Ecol.*, vol. 20, no. 4, pp. 792–802, 2016.
[70] R. Pipatti *et al.*, “Waste Generation , Composition and Management Data,” 2006.
[71] SISTEMA ÚNICO DE INFORMACIÓN DE SERVICIOS PÚBLICOS DOMICILIARIOS, “Toneladas de barrido y recolección y transporte Empresa Aseo Internacional S.A. E.S.P.” .
[72] DANE, “Censo Nacional de Población y Vivienda 2018,” 2018.
[73] L. Guzmán and G. Huerta, “Caracterización de Residuos Sólidos del Barrido de las calles del Distrito de Trujillo,” Trujillo, 2012.
[74] J. V. Armijos Tinoco, “Caracterización de la generación de residuos de construcción en sistemas industrializados para viviendas de interés social, en la ciudad de Santiago de Cali,” 2019.
[75] J. A. Marin Orrego, “Análisis de la generación de residuos de construcción y demolición (RCD) en un proyecto institucional: estudio de caso,” 2019.
[76] D. Santana Díaz, G. A. Pérez Falcón, M. García Villarino, J. T. Gómez Moldes, and M. Morales González, “Diagnóstico de la gestión de residuos en una obra de construcción en el municipio de Varadero,” *Rev. Av. Científica*, vol. 13, no. 2, pp. 1–15, 2010.
[77] Aseo Internacional S.A. E.S.P., “MAPA DEL ÁREA DE PRESTACIÓN DEL SERVICIO APS MUNICIPIO DE SOACHA, CUNDINAMARCA - Macrorutas y microrutas recolección de residuos sólidos.”
[78] UPME, “Ayuda de la Calculadora Fecoc 2016,” 2016. .
[79] UNFCCC, “Global Warming Potentials (IPCC Second Assessment Report),” 1995. .
[80] R. Pipatti and P. Svardal, “Volume 5 Chapter 3: Solid Waste Disposal 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories,” 2006.
[81] SCS engineers, “Biogas Model Project 10297: Nuevo Mondoñedo Landfill Gas Recovery, Flaring and Energy Production and Transformation for Leachate Evaporation,” 2017.
[82] Alcaldía de Soacha, “Más de 4,5 billones de pesos asignados para la construcción de la PTAR Canoas en Soacha,” 2019.
[83] Empresa de Acueducto de Bogotá, “DESCRIPCION DE LA PTAR SALITRE Y

RECOPILACION DE LOS PRINCIPALES ASPECTOS OPERATIVOS," Bogotá.
[84] Empresa de Acueducto de Bogotá, "Productos PTAR Salitre - BIOGÁS." Bogotá.
[85] Empresa de Acueducto de Bogotá, "Productos PTAR Salitre - BIOSÓLIDOS." Bogotá.
[86] Empresa de Acueducto de Bogotá, "Productos PTAR Salitre." .
[87] M. R. J. Doorn *et al.*, "Volume 5 Chapter 6 Wastewater Treatment and Discharge 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories," 2006.
[88] IPCC SAR SYR and I. S. SYR, "Climate Change 1995: A report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 48, no. 8, pp. 4596–4603, 1996.
[89] CORPOEMA and UPME, "ESTIMACIÓN DE LOS CONSUMOS DE SUBSISTENCIA EN ENERGÍA ELÉCTRICA, GAS NATURAL Y GLP EN TERRITORIO NACIONAL SIN Y ZNI," 2019.
[90] Carbon Disclosure Project, "2017 - Cities Community-wide Emissions, Map," *Carbon Disclosure Project*. 2017.
[91] Observatorio Ambiental de Bogotá, "Emisiones equivalentes de dióxido de carbono per cápita," 2020. .
[92] E. R. Sharp *et al.*, "InVEST User ' s Guide," 2018.
[93] C. K. Makropoulos, K. Natsis, S. Liu, K. Mittas, and D. Butler, "Decision support for sustainable option selection in integrated urban water management," *Environ. Model. Softw.*, vol. 23, no. 12, pp. 1448–1460, 2008.
[94] J. S. Horsburgh, M. E. Leonardo, A. M. Abdallah, and D. E. Rosenberg, "Measuring water use, conservation, and differences by gender using an inexpensive, high frequency metering system," *Environ. Model. Softw.*, vol. 96, pp. 83–94, 2017.
[95] Consejo Colombiano de Construcción Sostenible and Secretaría Distrital de Planeación, *Bases Técnicas para el Desarrollo del Protocolo de Implementación de la Resolución 549 de 2015*. Bogotá D.C., 2018.
[96] S. Pradhan, S. G. Al-Ghamdi, and H. R. Mackey, "Greywater recycling in buildings using living walls and green roofs: A review of the applicability and challenges," *Sci. Total Environ.*, vol. 652, pp. 330–344, 2019.
[97] K. S. Oh, J. Y. C. Leong, P. E. Poh, M. N. Chong, and E. Von Lau, "A review of greywater recycling related issues: Challenges and future prospects in Malaysia," *J. Clean. Prod.*, vol. 171, pp. 17–29, 2018.
[98] I. White, "Rainwater harvesting: Theorising and modelling issues that influence household adoption," *Water Sci. Technol.*, vol. 62, no. 2, pp. 370–377, 2010.
[99] H. Pavolová, T. Bakalár, D. Kudelas, and P. Puškárová, "Environmental and economic assessment of rainwater application in households," *J. Clean. Prod.*, vol. 209, pp. 1119–1125, 2019.
[100] I. Domínguez, S. Ward, J. G. Mendoza, C. I. Rincón, and E. R. Oviedo-Ocaña, "End-user cost-benefit prioritization for selecting rainwater harvesting and greywater reuse in social housing," *Water (Switzerland)*, vol. 9, no. 7, 2017.
[101] A. K. Marinoski and E. Ghisi, "Environmental performance of hybrid rainwater-greywater systems in residential buildings," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 144, pp. 100–114, 2019.
[102] Credit Valley Conservation, "Low Impact Development Stormwater Management Planning and Design Guide. Version 1.0. Toronto and Region Conservation Authority and Credit Valley Conservation Authority," 2010.
[103] C. Pakula and R. Stamminger, "Energy and water savings potential in automatic laundry washing processes," *Energy Effic.*, vol. 8, no. 2, pp. 205–222, 2015.
[104] A. Maimon, A. Tal, E. Friedler, and A. Gross, "Safe on-site reuse of greywater for irrigation - A critical review of current guidelines," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 44, no. 9, pp. 3213–3220, 2010.
[105] Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), "Investigación de las tipologías y/o tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C. Producto 2." Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo (EAB) & Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), Bogotá, 2015.

[106] Henry Barbosa, “Consejo de Soacha aprobó presupuesto de $375 mil millones para el año 2019,” 2018. .
[107] R. Pitt and J. Voorhees, “SLAMM , the Source Loading and Management Model,” pp. 1–29, 2002.
[108] State of green, “URBAN INNOVATION FOR LIVEABLE CITIES,” 2016.
[109] D. Johnson and S. Geisendorf, “Are Neighborhood-level SUDS Worth it? An Assessment of the Economic Value of Sustainable Urban Drainage System Scenarios Using Cost-Benefit Analyses,” *Ecol. Econ.*, vol. 158, no. November 2018, pp. 194–205, 2019.
[110] J. De Valck, A. Beames, I. Liekens, M. Bettens, P. Seuntjens, and S. Broekx, “Valuing urban ecosystem services in sustainable brownfield redevelopment,” *Ecosyst. Serv.*, vol. 35, no. November 2018, pp. 139–149, 2019.
[111] Center for Neighborhood Technology, “The Value of Green Infrastructure: A Guide to Recognizing Its Economic, Environmental and Social Benefits,” *Proc. Water Environ. Fed.*, pp. 1–76, 2010.
[112] University of Arkansas Community Design Center, “Low Impact Development: A Design Manual for Urban Areas,” 2018.
[113] Servicio Geológico de los Estados Unidos, “Earth Explorer.” .
[114] N. Dussadee, R. Ramaraj, and N. Sutassanamarlee, “Effect of plant shading and water consumption on heat reduction of ambient air,” *Chiang Mai J. Sci.*, vol. 45, no. 1, pp. 188–197, 2018.
[115] R. S. De Groot, M. A. Wilson, and R. M. J. Boumans, “A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services,” vol. 41, pp. 393–408, 2002.
[116] Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAB-ESP), “Tarifa servicios de acueducto y alcantarillado,” 2018. .
[117] Ministerio de Medio Ambiente, “Tarifa Mínima Tasa Retributiva por Vertimientos Puntuales del Agua 2019,” no. 8, p. 3323400, 2019.
[118] A. Smith, K. Brown, S. Ogilvie, K. Rushton, and J. Bates, “Waste Management Options and Climate Change: Final Report,” 2001.
[119] OECD, “Improving Plastics Management : Trends, policy responses, and the role of international co-operation and trade,” 2018.
[120] Waste and Resources Action Programme WRAP UK, “Comparing the cost of alternative waste treatment options - Gate Fees report 2016,” 2016. .
[121] United Nations, “Waste Management,” in *TRENDS IN SUSTAINABLE DEVELOPMENT Chemicals, mining, transport and waste management*, 2010, pp. 26–35.
[122] Departamento Nacional de Planeación Subdirección Territorial y de Inversiones Públicas, “45 Lineamientos para la construcción de estación de clasificación y aprovechamiento de residuos sólidos -ECA.”
[123] Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico - CRA, “Documento Final Análisis de Impacto Normativo - AIN Proyecto Reconocimiento de la obligatoriedad de contar con sistemas de extracción, captura activa y pasiva para el manejo de gases en rellenos sanitarios dentro de las tarifas del servicio público de ase,” 2019.
[124] Departamento Nacional de Planeación, “CONPES 3874 POLÍTICA NACIONAL PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS,” Bogotá D.C., 2016.
[125] P. O. Njoku and J. N. Edokpayi, “Health and Environmental Risks of Residents Living Close to a Landfill : A Case Study of Thohoyandou Landfill , Limpopo Province , South Africa,” pp. 10–12, 2019.
[126] T. Tomes and L. Williams, “Ditching Diesel A Cost-benefit Analysis of Electric Refuse Collection,” Bristol, 2020.
[127] F. Ardolino, F. Parrillo, and U. Arena, “Biowaste-to-biomethane or biowaste-to-energy ? An LCA study on anaerobic digestion of organic waste,” *J. Clean. Prod.*, vol. 174, pp. 462–476, 2018.
[128] L. G. Anderson, “Effects of using renewable fuels on vehicle emissions,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, pp. 162–172, 2015.

[129] Secretaría Distrital de Movilidad, “Encuesta de Movilidad 2019,” 2019. .
[130] ITDP, “The bike share planning guide,” 2018.
[131] Gobierno de Colombia, “Colombia’s INDC - UNFCC,” 2015.
[132] DNP, “Conpes 3991 Política nacional de movilidad urbana y regional,” Bogotá D.C., Colombia, 2020.
[133] DNP, “Conpes 3943 - Política para el mejoramiento de la calidad del aire,” Bogotá D.C., Colombia, 2018.
[134] R. Morales-Betancourt *et al.*, “Exposure to fine particulate, black carbon, and particle number concentration in transportation microenvironments,” *Atmos. Environ.*, vol. 157, pp. 135–145, 2017.
[135] R. M. Betancourt, B. Galvis, J. M. Rincón-Riveros, M. A. Rincón-Caro, A. Rodriguez-Valencia, and O. L. Sarmiento, “Personal Exposure to Air Pollutants in a Bus Rapid Transit System: Impact of Fleet Age and Emission Standard,” *Atmos. Environ.*, vol. 202, no. July 2018, pp. 117–127, 2019.
[136] A. Akbarnezhad and J. Xiao, “Estimation and Minimization of Embodied Carbon of Buildings: A Review,” *Buildings*, vol. 7, no. 4, p. 5, Jan. 2017.
[137] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Cartilla sobre criterios ambientales para el diseño y construcción de la vivienda en Colombia.” 2011.
[138] Alcaldía Mayor de Bogotá, “Llantas y asfaltos reciclados para pavimentar a Bogotá: Apuesta ambiental del IDU a partir de 2012.” 2012.
[139] M. Guo *et al.*, “Effect of WMA-RAP technology on pavement performance of asphalt mixture: A state-of-the-art review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 266, p. 121704, Sep. 2020.
[140] Office of Asset Management Pavement and Construction, “The Use of Recycled Tire Rubber to Modify Asphalt Binder and Mixtures.” 2013.
[141] Tecnalia, “Estudio en la intensidad de utilización de materiales y economía circular en Colombia para la Misión de Crecimiento Verde - Porducto 1. Diagnóstico de eficiencia en uso de materiales y cierre de ciclos en los sectores manufacturero y de construcción en Co.” .
[142] Cementos Argos, “Cemento Verde | Amigable con el Planeta | Cementos Argos Colombia.” .
[143] “EDGE Materials Reference Guide,” 2018.
[144] G. Xu and X. Shi, “Characteristics and applications of fly ash as a sustainable construction material: A state-of-the-art review,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 136. Elsevier B.V., pp. 95–109, Sep-2018.
[145] J. L. Provis, A. Palomo, and C. Shi, “Advances in understanding alkali-activated materials,” *Cement and Concrete Research*, vol. 78. Elsevier Ltd, pp. 110–125, Dec-2015.
[146] ASTM C125-20, “Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA,” *B. ASTM Stand.*, vol. 04.02, pp. 1–9, 2020.
[147] B. G. Kutchko and A. G. Kim, “Fly ash characterization by SEM-EDS,” *Fuel*, vol. 85, no. 17–18, pp. 2537–2544, Dec. 2006.
[148] American Society for Testing and Materials, “ASTM C618-19, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete,” *Annu. B. ASTM Stand.*, no. C, p. 5, 2019.
[149] A. Durán-Herrera, C. A. Juárez, P. Valdez, and D. P. Bentz, “Evaluation of sustainable high-volume fly ash concretes,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 1, pp. 39–45, Jan. 2011.
[150] C. H. Huang, S. K. Lin, C. S. Chang, and H. J. Chen, “Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 46, pp. 71–78, Sep. 2013.
[151] C. D. Atiş, “High-volume fly ash concrete with high strength and low drying shrinkage,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 15, no. 2, pp. 153–156, Mar. 2003.
[152] J. Khunthongkeaw, S. Tangtermsirikul, and T. Leelawat, “A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 9, pp. 744–753, Nov. 2006.
[153] Sustainable Recycling Industries, “Life Cycle Inventories of Cement, Concrete and Related

Industries - Colombia and Peru.” 2018.
[154] L. A. Fonseca Barrera, “Empleo de ceniza volante colombiana como material cementicio suplementario y sus efectos sobre la fijación de cloruros en concretos.” 2016.
[155] Circular Ecology, “ICE Database.” 2019.
[156] “OVNICOM SAS.” .
[157] AHINCO SA, “AHINCO S.A.” .
[158] ICONTEC, “NTC 6312:2019 - CEMENTOS. ESPECIFICACIONES PARA MEZCLAS DE MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS.” 2019.
[159] ICONTEC, “NTC 3493:2019- Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, para uso en el concreto,” 2019.
[160] National Precast Concretee Association, “Using Fly Ash in Concrete,” *2010*. .
[161] K. Harries and B. Sharma, “Nonconventional and Vernacular Construction Materials - 1st Edition,” 2019. .
[162] F. V. Riza, I. A. Rahman, A. Mujahid, and A. Zaidi, “A brief review of Compressed Stabilized Earth Brick (CSEB),” in *CSSR 2010 - 2010 International Conference on Science and Social Research*, 2010, pp. 999–1004.
[163] LADRILLERA SANTA FE, “Bloque # 5 33 x 23 x 11,5 cm 12,25 u/m2 - Homecenter.com.co,” 2020. .
[164] PRENSA LIBRE CASANARE, “Con ladrillos ecológicos y al estilo Lego se construye en Casanare,” 2017. .
[165] ICONTEC, “NTC 5324:2004 - Bloques de suelo cemento para muros y divisiones. definiciones. especificaciones. metodos de ensayo. condiciones de entrega.” 2004.
[166] Federal Highway Administration Research and Technology, “REPORT: User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction.” 2016.
[167] M. Mostafa, J. Adedayo Adedeji, and S. Abejide, “Implementing waste oils with reclaimed asphalt pavement,” in *World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering*, 2017.
[168] F. R. G. Padula, S. Nicodemos, J. C. Mendes, R. Willis, and A. Taylor, “Evaluation of fatigue performance of high RAP-WMA mixtures,” *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 12, no. 4, pp. 430–434, Jul. 2019.
[169] L. Noferini, “Performances and durability of asphalt mixtures made with reclaimed asphalt pavement,” 2016.
[170] “Warm Mix Asphalt - EAPA.” .
[171] F. Ma, A. Sha, R. Lin, Y. Huang, and C. Wang, “Greenhouse Gas Emissions from Asphalt Pavement Construction: A Case Study in China,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 13, no. 3, p. 351, Mar. 2016.
[172] R. S. Mcdaniel, H. Soleymani, R. M. Anderson, P. Turner, and R. Peterson, “Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the superpave mix design method.” 2000.
[173] W. Song, B. Huang, and X. Shu, “Influence of warm-mix asphalt technology and rejuvenator on performance of asphalt mixtures containing 50% reclaimed asphalt pavement,” *J. Clean. Prod.*, vol. 192, pp. 191–198, Aug. 2018.
[174] S. D. Capitão, L. G. Picado-Santos, and F. Martinho, “Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt,” *Construction and Building Materials*, vol. 36. pp. 1016–1024, Nov-2012.
[175] National Center for Asphalt Technology NCAT, “Effect of Changing Virgin Binder Grade and Content on RAP Mixture Properties.” .
[176] R. Vidal, E. Moliner, G. Martínez, and M. C. Rubio, “Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 74, pp. 101–114, May 2013.
[177] R. Rughooputh, R. Beeharry, and H. Qasrawi, “Warm mix asphalt for better sustainability under tropical climate,” *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 21, no. 1, pp. 1–8, Jan. 2020.
[178] Y. S. Hamdar, H. A. Kassem, and G. R. Chehab, “Using different performance measures for the

sustainability assessment of asphalt mixtures: case of warm mix asphalt in a hot climate," *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 21, no. 1, pp. 1–24, Jan. 2020.
[179] IDU, "Boletín No. 1 - Abril - SOSTENIBILIDAD - Mezclas Asfálticas Tibias (MAT)." 2014.
[180] IDU, "Boletín técnico No. 1 - Caracterización de mezclas asfálticas." 2015.
[181] INVIAS, "Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras." 2014.
[182] Secretaría Distrital de Ambiente, "Resolución 1115 de 2012." 2012.
[183] M. I. Rodríguez Eusse, "Proyecto piloto de ahorro en vivienda para el modelo de financiamento verde en Colombia," 2016.
[184] Consejo Colombiano de Construcción Sostenible and Alcaldía Mayor de Bogotá, "Términos de referencia para la definición de las Bases Técnicas del Protocolo de Implementación de la Resolución 549 de 2015 en Bogotá," Bogotá, 2017.
[185] D. Departamento Administrativo Nacional de Estadística, "Serie de Indicadores de la encuesta de Calidad de Vida." 2018.
[186] Universidad de los Andes, "Zero Greenhouse Gas Emissions Roadmap para Colombia: Diagnóstico, perspectivas y lineamiento para definir estrategias posibles ante el cambio climático (en desarrollo).," 2020.
[187] "Estufa Vidrio Templado 60x51 cm 4 Puestos CG401-V5C - Abba - 286094." .
[188] "Lavadora Automática 19Kg Blanco LMA79114SbAB0 - Mabe - 334928." .
[189] J. Rantanen, S. Lehtinen, A. Valenti, and S. Iavicoli, "A global survey on occupational health services in selected international commission on occupational health (ICOH) member countries," *BMC Public Health*, pp. 1–15, 2017.
[190] Departamento Nacional de Planeación de Colombia, "Seguimiento - OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE." .
[191] D. C. Wilson *et al.*, "'Wasteaware' benchmark indicators for integrated sustainable waste management in cities," *Waste Manag.*, vol. 35, pp. 329–342, 2015.
[192] Sinclair Knight Merz, "International Waste Strategy Benchmarking," 2012.
[193] P. Gaudillat, I. S. Antonopoulos, P. Canfora, M. Dri, European Commission. Joint Research Centre., and A. I. S, *Best Environmental Management Practice for the Waste Management Sector Learning from frontrunners*, no. May. 2018.
[194] PricewaterhouseCoopers, Significant, and Ecofys, "Collection of statistical information on Green Public Procurement in the EU Report on data collection results," 2009.
[195] The Economist Intelligence Unit, "FOOD SUSTAINABILITY INDEX. FOOD LOSS AND WASTE." .
[196] OECD, *OECD Factbook 2010: Economic, Environmental and Social Statistics*. Paris: OECD Publishing, 2010.
[197] Banco Mundial, "Banco de datos. Indicadores del desarrollo mundial." .
[198] Banco Interamericano de Desarrollo, "Informe de la Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el CAribe 2010," 2010.
[199] L. García Botero, "Sostenibilidad de la disposción de escombros de construcción y demolición en Bogotá," Universidad de los Andes, 2003.
[200] SISTEMA ÚNICO DE INFORMACIÓN DE SERVICIOS PÚBLICOS DOMICILIARIOS, "Vehiculos Registrados Empresa ASEO INTERNACIONAL S.A. E.S.P." .
[201] Aseo Internacional S.A. E.S.P., "Informe de Gestión Enero – Diciembre 2018," 2018.
[202] "FACTORES DE EMISION DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL COLOMBIA-SIN," Bogotá, 2017.
[203] U. de P. M. E. (UPME), "Calculadora FECOC 2016," 2016. .
[204] Green House Protocol, "Global Warming Potential Values," 2015.
[205] U. de P. M. E. (UPME), "FACTORES DE EMISION DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL COLOMBIA-SIN." 2017.
[206] "EDGE APP." .

[207] Instituto Geográfico Agustín Codazzi, “Mapa urbano del municipio de Soacha.” Soacha, 2016.
[208] Municipio de Soacha, “Ortofotografía área urbana del municion de Soacha Cundinamarca.” Soacha, 2015.
[209] G. Schosinsky and M. Losilla, “Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual,” *Rev. Geológica América Cent.*, pp. 43–55, 2000.
[210] GRIVAL, “Ducha Arce Cuadrada Sencilla,” 2020. .
[211] Construdata, “Suministro e instalación de aparatos,” p. 237, 2019.
[212] Corona, “Sanitario Aquapro Redondo Blanco,” 2020. .
[213] GRIVAL, “Ahorrador Doble Función Negro Cromo,” 2020. .
[214] GRIVAL, “Ducha Artesa Pro,” 2020. .
[215] GRIVAL, “Ducha Piscis Plus,” 2020. .
[216] Corona, “Regadera con Brazo Koral,” 2020. .
[217] Corona, “Sanitario Ecoclean Blanco,” 2020. .
[218] Corona, “Sanitario Montecarlo,” 2020. .
[219] Cerámica Italia, “Sanitario Granada Blanco.” .
[220] ALOAQUA, “AQUALOOP 6 Greywater Recycling System, incl. Pump,” 2020. .
[221] ALOAQUA, “Water Treatment System Full House / Bore or Town Supply Water,” 2020. .
[222] ALOAQUA, “Rainwater Harvesting System Stainless Steel 5000 litre - Home and Garden,” 2020. .
[223] PAVCO, “Lista de precios.” Mexichem Buildign & Infrastructure, Bogotá D.C., 2018.
[224] Banco de la República, “Series IPC total nacional e inflación (desde 07/1954).” 2020.
[225] S. L. Jiménez Ariza *et al.*, “A multicriteria planning framework to locate and select sustainable urban drainage systems (SUDS) in consolidated urban areas,” *Sustain.*, vol. 11, no. 8, 2019.
[226] H. Deng, C. H. Yeh, and R. J. Willis, “Inter-company comparison using modified TOPSIS with objective weights,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 27, no. 10, pp. 963–973, 2000.
[227] G. Nicoletti, S. Scarpetta, and O. Boylaud, “Summary Indicators of Product Market Regulation with an Extension to Employment Protection Legislation. OECD, ECO Working Paper No. 226,” 1999.
[228] E. Strecker, A. Sheffield, C. Cristina, and M. Leisenring, “Stormwater BMP Guidance Tool. A Stormwater Best Management Practices Guide for Orleans and Jefferson Parishes,” 2010.
[229] B. W. Ballard, R. Kellagher, P. Martin, C.Jefferies, R. Bray, and P. Shaffer, *The SUDS manual*. 2007.
[230] Geosyntec Consultants, “A User’s Guide for the Structural BMP Prioritization and Analysis Tool (SBPAT v1.0),” Los Angeles, 2008.
[231] Riverside County Flood Control and Water Conservation District., *Design Handbook for Low Impact Development Best Management Practices*. Riverside, CA, USA, 2011.
[232] City of Edmoton., “Low Impact Development Best Management Practices Design Guide,” no. November, 2011.
[233] City of Santa Rosa., *Storm Water. Low Impact Development Technical Design Manual*. Santa Rosa, CA, USA: City of Santa Rosa & The County of Sonoma, 2011.
[234] L. Faha, M. Faha, and B. Milligan, *Low Impact Development Approaches Handbook*. Tualatin, OR, USA: Clean Water Services, 2009.
[235] Center for Watershed Protection., *Maryland Stormwater Design Manual. Volumes I & II*. MD, USA: Maryland Department of the Environment, 2000.
[236] Department of Defense - USA, *Unified Facilities Criteria (UFC): Low Impact Development Manual*. USA, 2010.
[237] Toronto and Region Conservation Authority, “Low Impact Development Stormwater Management Planning and Design Guide,” Toronto, 2010.
[238] Virginia Department of Transportation, “BMP Desing Manual of Practice,” vol. 1, p. 344, 2013.
[239] A. I. Racoviceanu, B. W. Karney, M. Asce, C. A. Kennedy, and A. F. Colombo, “Life-Cycle Energy Use and Greenhouse Gas Emissions Inventory for Water Treatment Systems.”

[240] Urban Drainage and Flood Control Distric., *Urban Storm Drainage. Criteria Manual. Volume 3-Best Management Practices*. Denver, CO, USA: Water Resources Publications, LLC, 2010.
[241] H. Jia, H. Yao, Y. Tang, S. L. Yu, J. X. Zhen, and Y. Lu, "Development of a multi-criteria index ranking system for urban runoff best management practices (BMPs) selection," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 185, no. 9, pp. 7915–7933, 2013.
[242] N. Bernal, J. P. Rodríguez, and G. Peyre, "Propuesta metodológica para la estimación de valores económicos de servicios ecosistémicos provistos por Sistermas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Caso de estudio: Reserva Thomas Van der Hammen," Universidad de los Andes, 2019.
[243] Geosyntec Consultants, "Stormwater Best Management Practices: Guidance Document," no. January, p. 640, 2013.
[244] Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), "Investigación de las tipologías y/o tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá. Producto 3 - Diseño detallado para la construcción y monitoreo de los pilotos de SUDS y TDR." Bogotá D.C., 2016.
[245] Minnesota Pollution Control Agency, "Best Management Practices Construction Costs, Maintenance Costs, and Land Requirements," no. June. Minnesota, 2011.
[246] Secretaría Distrital de Ambiente, "Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá - RMCAB." .
[247] "EAB SISGEO." .
[248] Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, "Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia," 2000.
[249] Č. Maksimović, M. Kurian, and R. Ardakanian, *Rethinking Multi-Use Design for Infrastructure Water Services*. .
[250] T. Elmqvist *et al.*, *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities.*, vol. 103, no. 2. 2013.
[251] E. A. Ramírez-Aguilar and L. C. Lucas Souza, "Urban form and population density: Influences on Urban Heat Island intensities in Bogotá, Colombia," *Urban Clim.*, vol. 29, no. May, p. 100497, 2019.
[252] A. C. Targino, G. C. Coraiola, and P. Krecl, "Green or blue spaces? Assessment of the effectiveness and costs to mitigate the urban heat island in a Latin American city," *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 136, no. 3–4, pp. 971–984, 2019.
[253] C. Dobbs, Á. Hernández-Moreno, S. Reyes-Paecke, and M. D. Miranda, "Exploring temporal dynamics of urban ecosystem services in Latin America: The case of Bogota (Colombia) and Santiago (Chile)," *Ecol. Indic.*, vol. 85, no. November 2017, pp. 1068–1080, 2018.
[254] Z. Zou, Y. Yang, and G. Y. Qiu, "Quantifying the evapotranspiration rate and its cooling effects of urban hedges based on three-temperature model and infrared remote sensing," *Remote Sens.*, vol. 11, no. 2, pp. 1–18, 2019.
[255] L. wei ZHU and P. ZHAO, "Temporal Variation in Sap-Flux-Scaled Transpiration and Cooling Effect of a Subtropical Schima superba Plantation in the Urban Area of Guangzhou," *J. Integr. Agric.*, vol. 12, no. 8, pp. 1350–1356, 2013.
[256] X. Chen, P. Zhao, Y. Hu, L. Ouyang, L. Zhu, and G. Ni, "Canopy transpiration and its cooling effect of three urban tree species in a subtropical city- Guangzhou, China," *Urban For. Urban Green.*, vol. 43, no. June, p. 126368, 2019.
[257] L. Shi, P. Liu, I. Kloog, M. Lee, A. Kosheleva, and J. Schwartz, "Estimating daily air temperature across the Southeastern United States using high-resolution satellite data: A statistical modeling study," *Environ. Res.*, vol. 146, pp. 51–58, 2016.
[258] R. S. dos Santos, "Estimating spatio-temporal air temperature in London (UK) using machine learning and earth observation satellite data," *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, vol. 88, no. October 2018, p. 102066, 2020.
[259] C. Yoo, J. Im, S. Park, and L. J. Quackenbush, "Estimation of daily maximum and minimum air temperatures in urban landscapes using MODIS time series satellite data," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 137, pp. 149–162, 2018.

[260] R. Pitt, A. Maestre, and R. Morquecho, “Findings from the National Stormwater Quality Database (NSQD),” *1st Annu. Stormwater …*, no. January, pp. 1–9, 2004.
[261] Aseo Internacional S.A. E.S.P., “Tarifas 2019.” .
[262] CONSORCIO PGIRS SOACHA, “Tomo 3,” in *ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS PGIRS PARA EL MUNICIPIO DE SOACHA DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA*, 2015.
[263] AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES - ANLA, “RESOLUCIÓN N°02030,” 2018.
[264] Periodismo Público, “Aseo Internacional lanza en Soacha proyecto de contenerización,” Soacha, Dec-2016.
[265] AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN (JICA) and UAESP, “Proyecto de Estudio del Plan Maestro para el Manejo Integral de Residuos Sólidos en Bogotá, D.C. Informe Final Volumen I,” 2013.
[266] IRENA, “Technology Brief: Biogas for Road Vehicles,” 2018.
[267] “EnergyPlus.” .
[268] “OpenStudio.” .
[269] C. M. Rodríguez, J. M. Medina, A. Pinzón, and A. García, “A post-occupancy strategy to improve thermal comfort in social housing in a tropical highland climate: A case study in Bogotá, Colombia,” *Inf. la Constr.*, vol. 71, no. 555, 2019.
[270] Ministerio de Vivienda, “Anexo Técnico 1: Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones,” 2013.
[271] Y. Chen and T. Hong, “Impacts of building geometry modeling methods on the simulation results of urban building energy models A R T I C L E I N F O,” 2018.
[272] M. H. Echenique, A. J. Hargreaves, G. Mitchell, M. H. Echenique, A. J. Hargreaves, and G. Mitchell, “Does Urban Form Really Matter ?,” *J. Am. Plan. Assoc.*, vol. 4363, no. May, 2012.
[273] C. Cerezo Davila, C. F. Reinhart, and J. L. Bemis, “Modeling Boston: A workflow for the efficient generation and maintenance of urban building energy models from existing geospatial datasets,” *Energy*, vol. 117, pp. 237–250, Dec. 2016.
[274] Y. Han, J. E. Taylor, and A. L. Pisello, “Exploring mutual shading and mutual reflection inter-building effects on building energy performance,” *Appl. Energy*, vol. 185, pp. 1556–1564, 2015.
[275] Y. Han, J. E. Taylor, M. J. Garvin, I. T. Moore, and A. L. Pisello, “Urban Building Networks ’ Thermal-Energy Dynamics : Exploring , Mitigating , and Optimizing Inter-Building Effects,” 2016.
[276] UPME, “Evaluación de la situación actual y futura del mercado de los materiales de construcción y arcillas en las ciudades de Bogotá, Medellín, Bucaramanga, Barranquilla, Santa Marta y Eje Cafetero.” 2014.

Anexo 5. Marcos de referencia para la comparación de indicadores del sector Gestión de Residuos

- **Nivel de cumplimiento de derechos laborales**

Los rangos para el presente indicador se estimaron teniendo como referencia el nivel de cobertura de servicios de salud ocupacional en diferentes países del mundo. De acuerdo con [189], el porcentaje de cobertura en gran parte de los países miembros de la OCDE es mayor al 50%. Sin embargo, países miembros como Estonia, Luxemburgo, España, Finlandia, Japón, Italia y Países Bajos presentan un porcentaje de cobertura entre el 80 y 100%. Teniendo en cuenta que Colombia se convirtió en el 37° país miembro de la OCDE, se considera que los valores de cobertura de servicios de salud ocupacional en el país deben compararse con los estándares alcanzados por los demás países miembros de la OCDE, por lo que se establece para las etiquetas *Bueno* y *Muy Bueno* los rangos 80-90% y 90-100% respectivamente. La categoría *Normal* se definió teniendo en cuenta los valores de afiliación de países como Chile, Noruega y Alemania. Igualmente, el porcentaje de afiliación a ARL de Bogotá en 2018 se encuentra dentro de este rango (56.4%) [190]. En la categoría *Malo* se encuentra la fracción de la población ocupada de Colombia afiliada a ARL en 2018 (36.7%) así como la meta nacional de afiliación a ARL para 2030 (48% de la población ocupada). Asimismo, dentro de la categoría *Muy malo* se enmarcan los porcentajes de afiliación de 12 departamentos de Colombia según datos de 2018, siendo el más bajo el correspondiente a La Guajira con 14.7% de la población ocupada afiliada a ARL[190].

Tabla 133. Valores para la definición de rangos del indicador Nivel de cumplimiento de derechos laborales

Muy malo	Malo	Normal	Bueno	Muy bueno
0-30%	30-50%	50-80%	80-90	90-100%

- **Asequibilidad del servicio de aseo**

El cobro al usuario por la gestión de residuos debe constituir entre 1 y 1.5% de los ingresos del hogar [19]. Este valor se empleó como referencia para definir las funciones de pertenencia para el indicador de asequibilidad.

Tabla 134 Rangos para la comparación del indicador Asequibilidad del servicio de aseo

	Muy malo	Malo	Normal	Bueno	Muy bueno
Sobre total de ingresos	>2.5%	2.5-1.5%	1.5-1%	1-0.75%	< 0.75%

- **Cobertura de recolección domiciliaria de residuos sólidos**

Para definir la categorización de este indicador se utilizaron como referentes los valores sugeridos por Wilson et al. [191] para el indicador de porcentaje de hogares con servicio confiable de recolección de residuos, definiendo confiable como con frecuencia adecuada de acuerdo con las condiciones climáticas de la zona y las características de los residuos generados.

Tabla 135 Rangos para la comparación del indicador Cobertura de recolección domiciliaria de residuos sólidos

Muy malo	Malo	Normal	Bueno	Muy bueno
0-49%	50-69%	70-89%	90-98%	99-100%

- **Porcentaje de residuos con disposición final adecuada**

Para definir la categorización de este indicador se utilizaron como referentes los valores sugeridos por Wilson et al. [191], teniendo en cuenta además que la meta nacional de residuos con disposición final adecuada para 2030 es del 100% [27].

Tabla 136. Rangos para la comparación del indicador Porcentaje de residuos con disposición final adecuada

Muy malo	Malo	Normal	Bueno	Muy bueno
0-49%	50-74%	75-84%	85-94%	95-100%

- **Cobertura de recolección diferenciada de residuos sólidos**

Para definir la categorización de este indicador se utilizaron como referentes los valores sugeridos por Wilson et al.[191] para el indicador de cobertura de recolección de residuos. Sin embargo, teniendo en cuenta el enfoque de gestión integral de residuos sólidos que promueve el aprovechamiento frente a la disposición final, se establecen estos mismos rangos como referencia para comparar la cobertura de recolección diferenciada de residuos generados en Ciudad Verde.

Tabla 137 Rangos para la comparación del indicador Cobertura de recolección diferenciada de residuos sólidos

Muy malo	Malo	Normal	Bueno	Muy bueno
0-49%	50-69%	70-89%	90-98%	99-100%

- **Porcentaje de residuos aprovechados**

Para definir la categorización de este indicador se utilizaron como referentes los valores sugeridos por Wilson et al.[191] para el indicador de tasa de reciclaje (% del total de los residuos sólidos generados que es reciclado), realizando una corrección para expresar los residuos aprovechados como fracción de los potencialmente aprovechables y no el total de los generados. Lo anterior se realizó teniendo en cuenta la composición y aprovechamiento de los residuos específicamente en el contexto de Ciudad Verde, por lo que sería necesario ajustarlo en caso de requerir usarlo para la evaluación de otro proyecto. Considerando como material potencialmente aprovechable el cartón, papel, plástico, vidrio, metales y materia orgánica[26], este constituye el 88.7% de los residuos domiciliarios generados en Ciudad Verde.
Las categorías para la comparación del indicador se muestran a continuación:

Tabla 138. Rangos para la comparación del indicador Porcentaje de Residuos Aprovechados

	Muy malo	Malo	Normal	Bueno	Muy bueno
Wilson et al.[191]	0-9%	10-24%	25-44%	45-64%	>65%
Corregido (88.7% MPR)	0-11.3%	11.3-28.2%	28.2-50.7%	50.7-73.3%	73.30%

- **Porcentaje de RCD generados en la construcción que son aprovechados**

Los rangos de categorización del indicador se determinaron a partir de información sobre tasas de reciclaje y reutilización de RCD y metas de aprovechamiento de estos residuos en países alrededor del mundo como Holanda (con una tasa de 95% de reúso y reciclaje de RCD) y la meta de la Unión Europea para antes de 2020: 70% en peso de aprovechamiento para los RCD no peligrosos [192].

Tabla 139 Rangos para la comparación del indicador Porcentaje de RCD generados en la construcción que son aprovechados

Muy malo	Malo	Normal	Bueno	Muy bueno
0-5%	5-25%	25-50%	50-80%	>80%

- **Generación de residuos domiciliarios per cápita**

Los valores de referencia para la comparación de este indicador se definieron a partir del criterio de generación de 360 kg/habitante/año para residuos domiciliarios indicado por [193]. Además, de acuerdo con los rangos definidos, los países de alto ingreso económico tienen una generación clasificada como Muy malo, mientras que los países de menor ingreso económico se ubican en la categoría Bueno [25].

Tabla 140 Rangos para comparación del indicador Generación de residuos per cápita.

Muy malo	Malo	Normal	Bueno	Muy bueno
>720 kg/hab/año	720-360 kg/hab/año	360-270 kg/hab/año	270-180 kg/hab/año	<180 kg/hab/año

- **Compras sostenibles en entidades públicas**

Como valores de referencia para la comparación del desempeño de este indicador puede emplearse los valores de porcentaje de compras públicas sostenibles sobre el total de compras públicas realizadas en términos monetarios que se muestran en la figura a continuación para algunos países miembros de la OCDE [194]:

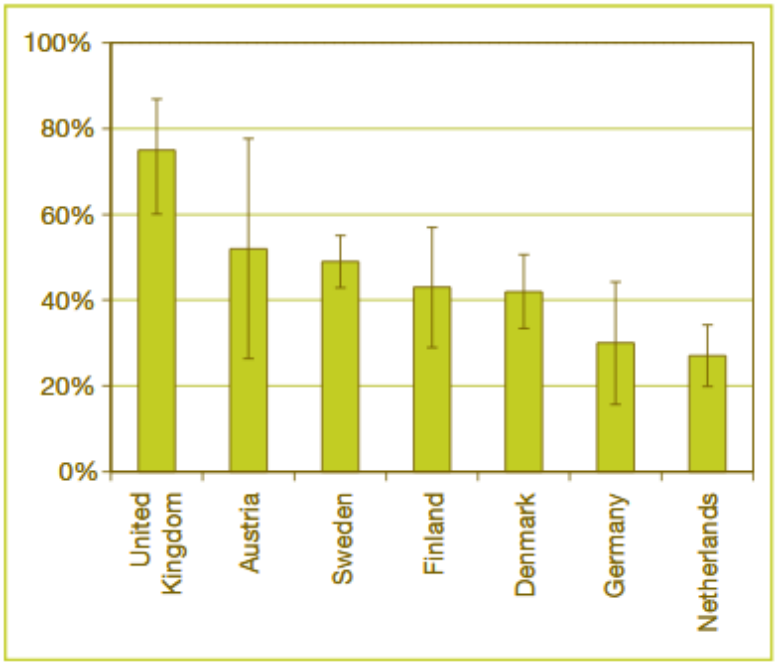


Figura 125. Porcentaje de compras públicas verdes sobre el total de compras públicas en términos monetarios en países de Europa. Tomado de [194].

- **Desperdicio evitable de alimentos per cápita**

Los rangos para la comparación de este indicador se definieron con base en valores a nivel mundial de desperdicio de alimento en la etapa de consumo final utilizados para la construcción de categorías del Food Sustainability Index [195]:

Tabla 141 Rangos para la comparación del indicador Desperdicio evitable de alimentos per cápita

Muy malo	Malo	Normal	Bueno	Muy bueno
>90 kg/hab/año	90-60 kg/hab/año	60-34 kg/hab/año	34-6 kg/hab/año	<6 kg/hab/año

Anexo 6. Cálculo de línea base de emisiones de GEI del sector Gestión de Residuos

- **Cambio en la generación de residuos per cápita con la variación del PIB**

Para determinar la relación entre la generación de residuos y el PIB, se analizaron datos de generación per cápita (PPC) de residuos sólidos domiciliarios y PIB per cápita en 26 países con diferente nivel de ingreso: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, Jamaica, México, Nicaragua, Panamá. Paraguay, Perú, República Dominicana, Uruguay, Venezuela, Estados Unidos, Suiza, Alemania, España, Reino Unido, Italia, Francia y Suecia [196][197][198]. Comparando la pareja de valores de PPC y PIB per cápita para cada país, se obtuvo la gráfica presentada a continuación, que permite establecer una función directamente proporcional entre la generación de residuos y el ingreso económico del país.

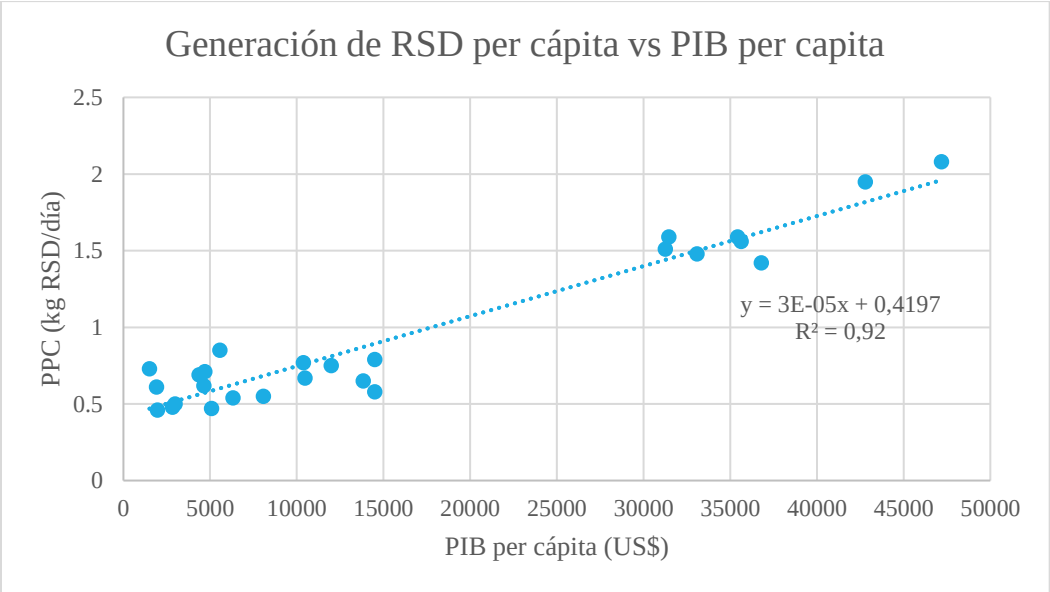


Figura 126. Relación entre generación de RSD per cápita y PIB per cápita

Utilizando la ecuación obtenida y los valores proyectados de PIB per cápita para Colombia hasta el año 2030, se determinó la proyección de PPC aplicable a los habitantes de Ciudad Verde para el horizonte de la línea base.

Tabla 142. Proyección de PIB per cápita en Colombia y cuantificación de PPC de residuos domiciliarios por año

Año	PIB per cápita (Miles USD)	PPC (kg/día)
2018	7.94	0.548
2019	8.15	0.664
2020	8.40	0.672
2021	8.67	0.680
2022	8.97	0.689
2023	9.28	0.698
2024	9.59	0.707

2025	9.91	0.717
2026	10.22	0.726
2027	10.53	0.736
2028	10.86	0.745
2029	11.19	0.755
2030	11.53	0.766

- **Cuantificación residuos de demolición y construcción (RCD)**

Como se indica en el informe principal, la cantidad de RCD generados en la construcción de VIS/VIP de sistema industrializado se estimó con base en los resultados de [74]. Para el caso de viviendas construidas en mampostería confinada y mampostería estructural, se aproximó el índice de generación de RCD a partir de los valores de [74] para sistema industrializado y la relación entre la cantidad de RCD generados por la construcción con sistema industrializado y con mampostería estructural reportados en [199]. Se asume que la cantidad de residuos de excavación por m2 construido no cambia con el tipo de sistema constructivo.

La estimación del porcentaje de aprovechamiento de los RCD generados en la construcción de las edificaciones residenciales e institucionales en Ciudad Verde (CV) se realizó a partir de los datos reportados por la empresa constructora Amarilo para la generación y aprovechamiento de RCD durante la construcción de VIS y VIP en el año 2017 [28]. De acuerdo con lo expresado por la constructora en su Informe de Sostenibilidad, se asumió que todo el papel/cartón, PVC, plástico y madera fue aprovechado.

Tabla 143. Cantidad de RCD generados y aprovechados construcción de VIS/VIP Amarilo 2017. Adaptado de [28]

	Excavación	Escombros	Chatarra	Papel/cartón
Generado (kg)	54,672,750	19,781,000	84,128	1,855
Aprovechado (kg)	25,581,600	262,000	18,686	1,855
Tasa de Aprovechamiento	47%	1%	22%	100%

	PVC	Plástico	Madera	RESPEL	Icopor	**TOTAL**
Generado (kg)	1,225	671	43,616	1	12,673	74,597,919
Aprovechado (kg)	1,225	671	43,616	0	0	25,909,653
Tasa de Aprovechamiento	100%	100%	100%	0%	0%	35%

Teniendo en cuenta los procedimientos anteriores, se obtienen los siguientes índices de RCD generados y dispuestos por tipo de sistema constructivo para edificaciones residenciales e institucionales:

Tabla 144. Índice de generación y disposición de RCD de construcción de edificaciones residenciales por tipo de sistema constructivo y edificaciones institucionales

	Tipo de edificación					
	VIS/VIP Industrializado		**Institucional**		**VIS/VIP Mampostería**	
Fase	Generado	Dispuesto	Generado	Dispuesto	Generado	Dispuesto
Excavación (kg/m2)	572.3	304.5	282.9	150.6	572.3	304.5
Estructura y acabados (kg/m2)	73.4	72.2	33.9	33.3	184.1	181.0
TOTAL (kg/m2)	**645.7**	**376.7**	**316.8**	**183.9**	**756.4**	**485.6**

El resultado de cantidad de RCD que se disponen por cada metro cuadrado construido se relacionó con la cantidad de metros cuadrados construidos cada año en CV hasta el año en que finaliza la construcción del proyecto (2023).

Tabla 145. Área construida en Ciudad Verde cada año por tipo de sistema constructivo

Tipo de sistema constructivo		2018	2019	2020	2021	2022	2023
Residencial	Mampostería Confinada (m^2)	3,322	2,266	2,485	2,485	2,485	1,139
	Mampostería Estructural (m^2)	144,963	98,876	108,418	108,418	108,418	49,708
	Sistema Industrializado (m^2)	91,611	62,485	68,516	68,516	68,516	31,414
Institucional (m^2)		3,669	10,256	10,256	6,363	6,363	3,669

- **Cálculo de emisiones atribuidas al transporte de residuos a sitios de disposición final**

La recolección y transporte de residuos domiciliarios, de barrido y de poda y corte de césped de Ciudad Verde al sitio de disposición final (Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo) está a cargo de la empresa Aseo Internacional S.A. E.S.P. [24]. De acuerdo con [21], para 2019, los camiones compactadores usados por la empresa Aseo Internacional S.A. para transportar los residuos sólidos del municipio de Soacha al relleno sanitario Nuevo Mondoñedo tienen las siguientes características:

Tabla 146. Características camiones compactadores Aseo Internacional S.A. E.S.P. Adaptado de [21].

Tipo de vehículo	Capacidad de la caja (yd^3)	Modelo	Marca Chasis
Compactador	17	2010	KENWORTH
Compactador	25	2015	FREIGHTLINER
Compactador doble	25	2013	MERCERDEZ BENZ
Compactador doble	25	2013	MERCERDEZ BENZ
Compactador doble	25	2013	MERCERDEZ BENZ
Compactador doble	25	2013	MERCERDEZ BENZ
Compactador doble	25	2013	MERCERDEZ BENZ
Compactador doble	25	2013	MERCERDEZ BENZ
Compactador doble	25	2013	MERCERDEZ BENZ
Compactador doble	25	2013	MERCERDEZ BENZ
Compactador doble	25	2013	MERCERDEZ BENZ
Compactador doble	25	2013	MERCERDEZ BENZ
Compactador 4*8	32	2018	SCANIA

Asumiendo que los camiones con capacidad de 17 yd^3 tienen una capacidad equivalente de 8 t, los de 25 yd^3 una capacidad de 14 t [200] y el de 32 yd^3 una capacidad aproximada de 17.4 t [201], se estimó que la capacidad promedio de los camiones compactadores es de 13.8 toneladas de residuos. Las emisiones se calcularon mediante la Ecuación 15.

Ecuación 15. Cálculo de emisiones de GEI atribuidas al transporte de residuos

$$\frac{Emisiones\ GEI}{año} = \sum \left(\frac{RS_{CV}}{u_{cap} * C_m} * (d_{int} + 2 * d_{CV-RS}) * \frac{1}{RCP} * \frac{3.78\ L}{gal} * \rho_c * LHV \right) * \frac{FE_i * GWP_i}{10^{12}}$$

i corresponde a cada uno de los GEI emitidos

Tabla 147. Parámetros considerados en el cálculo de emisiones por transporte de residuos.

Parámetro	Notación
Capacidad promedio camiones en masa (ton)	C_m
Recorrido interno aproximado (km)	d_{int}
Distancia CV - Relleno (km)	d_{CV-RS}
Rendimiento combustible con carga (km/gal)	
Rendimiento combustible sin carga (km/gal)	
Rendimiento combustible promedio (km/gal)	RCP
Residuos de CV transportados en 2018 (ton/año)	RS_{CV}

Uso capacidad de camiones (%)	u_{cap}
Combustible empleado	
Densidad combustible (kg/L)	P_c
Poder Calorífico Inferior combustible (kJ/kg)	LHV
Factor de emisión CO_2 del combustible (kg/TJ)	FE_{CO2}
Factor de emisión CH_4 del combustible (kg/TJ)	FE_{CH4}
Factor de emisión N_2O del combustible (kg/TJ)	FE_{N2O}
Potencial calentamiento global CO_2	GWP_{CO2}
Potencial calentamiento global CH_4	GWP_{CH4}
Potencial calentamiento global N_2O	GWP_{N2O}

La ecuación y parámetros planteados permiten, también, calcular las emisiones para el transporte de RCD de la etapa de construcción y fase de acabados en las viviendas obteniendo los resultados que se muestran en el informe principal.

- **Cálculo de emisiones por disposición de residuos en relleno sanitario**

Para determinar las emisiones de la disposición de residuos sólidos se recomiendan dos métodos: el balance de masa, correspondiente al primer nivel del inventario, y el método de decaimiento de primer orden, atribuido al segundo nivel del inventario de emisiones. Del método de decaimiento de primer orden resulta una estimación de emisiones más precisa en comparación con el método de balance de masa [80].

La estimación de emisiones de metano provenientes del relleno sanitario Nuevo Mondoñedo, que son causadas por residuos generados en Ciudad Verde, se realizó teniendo en cuenta los lineamientos del Nivel 2 del método de decaimiento de primer orden del IPCC. En este sentido, se emplearon datos históricos de disposición específicos para el relleno en estudio y, también, parámetros estándar definidos por el IPCC para contenidos de carbono degradable y vida media de los residuos. El análisis se llevó a cabo para los años de 2018 a 2030. Sin embargo, se tuvo en cuenta en el cálculo las emisiones causadas por la degradación de los residuos de CV que han sido dispuestos desde 2011 (año de inicio de operación del macroproyecto), dado que estos residuos generan GEI por varias décadas después de dispuestos.

El IPCC realiza la siguiente clasificación de residuos y establece sus parámetros estándar para cada uno de estos grupos.

- *Residuos Sólidos Municipales* que incluyen los residuos domiciliarios, los residuos de poda y los residuos comerciales/institucionales.
- *Lodos* provenientes de plantas de tratamiento de agua residual doméstica e industrial.
- *Residuos Industriales* que dependen del tipo de industria y procesos o tecnologías presentes en el sitio de estudio. Los residuos de demolición y construcción se encuentran dentro de esta categoría.
- *Otros residuos* que incluyen residuos hospitalarios, peligrosos y de agricultura.

Es relevante mencionar que los principales residuos generados y recolectados en Ciudad Verde son de tipo municipal, por lo que solamente se tuvo en cuenta esta categoría de residuos en la estimación de emisiones por disposición. Posterior a la adaptación de los datos de composición de los residuos dispuestos a las categorías del IPCC, se procedió a la cuantificación, por cada tipo de residuo, del carbono orgánico degradable disuelto (DDOC), es decir, la parte del carbono orgánico presente en los residuos que se descompone en condiciones anaeróbicas en el relleno sanitario (Ecuación 16).

Ecuación 16. Cálculo de masa de carbono orgánico degradable disuelto.

$$DDOC_m = W * DOC * DOC_f * MCF$$

Siendo: $DDOC_m$: Masa de DDOC dispuesto en el relleno (t); W: masa de residuos dispuestos (t); DOC: Fracción de carbono orgánico degradable (t de C/ t de residuo); DOC_f: Fracción de DOC que puede descomponerse (%); MCF: Factor de corrección de CH_4 por descomposición aeróbica (%).

Para el cálculo anterior, se asumieron los valores estándar del IPCC para los parámetros DOC, DOC_f y MCF (Tabla 148).

Tabla 148. Valores estándar IPCC parámetros DOC, DOCf y MFC [80].

Tipo de Material	DOC	DOC_f	MFC para rellenos con manejo y condiciones anaerobias
Comida	0.15	0.5	1
Poda	0.20	0.5	1
Papel	0.40	0.5	1
Madera y paja	0.43	0.5	1
Textiles	0.24	0.5	1
Pañales desechables	0.24	0.5	1
Lodos de aguas residuales	0.05	0.5	1
Caucho	0.39	0.5	1
RSM	0.18	0.5	1
Residuos Industriales	0.15	0.5	1

De acuerdo con el modelo de decaimiento de primero orden, si las condiciones son constantes la tasa de producción de metano depende solamente de la cantidad de carbón remanente en los residuos presentes en el relleno [80]. Para efectos del presente estudio, se consideró que los residuos dispuestos durante un año empezarán a generar metano desde el año siguiente a su disposición. La Ecuación 17 y la Ecuación 18 calculan la cantidad de DDOC acumulado en el relleno al término del año de interés y la masa de DDOC que se degradó durante ese mismo año.

Ecuación 17. Masa de DDOC acumulada en el relleno al término del año de interés.

$$DDOCma_T = DDOCmd_T + (DDOCma_{T-1} * e^{-k})$$

Ecuación 18. Masa de DDOC degradada durante el año de interés.

$$DDOCm\ descomp_T = DDOCma_{T-1} * (1 - e^{-k})$$

Donde: T: año de inventario; $DDOCma_T$: Masa de DDOC acumulado en el relleno al final del año T (t); $DDOCma_{T-1}$: Masa de DDOC acumulado en el relleno al final del año T-1 (t); $DDOCmd_T$: Masa de DDOC dispuesta en el relleno durante el año T (t); DDOCm $descomp_T$: Masa de DDOC degradado en el relleno durante el año T (t); k: constate de reacción.

Los valores estándar establecidos en [80] para la constante de reacción k dependen de las condiciones meteorológicas del sitio donde se encuentre el relleno sanitario. De acuerdo con datos del IDEAM, la precipitación en la zona del relleno sanitario Nuevo Mondoñedo se encuentra por debajo de 1000 mm en promedio anual, lo que corresponde a una zona tropical seca en la clasificación del IPCC. En la Tabla 149 se muestra las constantes de reacción k en zonas secas tropicales para cada tipo de residuo.

Tabla 149. Valores estándar para la constante de reacción k en zonas tropicales secas [80].

Tipo de residuo		k – Constante de reacción (1/año)
Residuo de degradación lenta	Papel / Textil	0.045
	Madera / Paja / Caucho	0.025
Residuo de degradación moderada	Residuos de poda	0.065
Residuos de degradación rápida	Residuos de comida / Lodos de aguas residuales	0.085
Residuos sólidos municipales (RSM) o Residuos Industriales	Composición mixta	0.065

Posteriormente, considerando la cantidad de DDOCm que se degradó durante el año de inventario, se calculó la generación de CH_4 en el relleno a través de la Ecuación 19.

Ecuación 19. Metano generado a partir de materia orgánica en descomposición.

$$CH_4 generado_T = DDOCm\ descomp_T * F * \frac{16}{12}$$

Donde: $CH_4 generado_T$: CH_4 generado por la degradación de material; $DDOCm\ descomp_T$: Masa de DDOC degradado en el año T (t); F: Fracción volumétrica de CH_4 en el gas generado por el relleno; 16/12: cociente de pesos moleculares CH_4/C.

La mayoría de rellenos sanitarios generan gas con aproximadamente 60-50% de metano [80], por lo que se asumió como 0.5 la fracción *F* dentro de la Ecuación 19.

Teniendo en cuenta la cantidad de metano generado en el relleno cada año, se utilizó la Ecuación 20 para estimar las emisiones de metano provenientes de la descomposición anaeróbica de residuos en el relleno.

Ecuación 20. Cálculo de emisiones de metano en relleno sanitario.

$$Emisiones\ CH_4 = \left(\sum CH_4\ generado_{x,T} - R_T\right) * (1 - OX_T)$$

Siendo: Emisiones de CH_4: CH_4 emitido durante el año T (t); T: año del inventario; x: tipo de residuo; R_T: CH_4 recuperado en el año T (t); OX_T: factor de oxidación durante el año T (%).

De acuerdo con [81], en el relleno sanitario Nuevo Mondoñedo se captura y quema el 25% del biogás generado, por lo que el valor de R_T desde el año 2019 hasta el 2030 será el 25% del metano generado en el relleno durante cada año de interés. Según [80], las emisiones causadas por la quema de metano capturado no son significativas, pues el CO_2 liberado es de origen biogénico y las cantidades de CH_4 y N_2O emitidas son despreciables, por lo que no se tendrán en cuenta en el presente inventario. Para el caso del factor de oxidación se tomará un valor de 0, propio de los rellenos sanitarios gestionados pero no cubiertos con material aislado [80] para todo el horizonte del inventario. Los resultados de las emisiones generadas por la descomposición de materia orgánica de los residuos de Ciudad Verde en el relleno sanitario se muestran en el informe principal.

Anexo 7. Metodología de evaluación de consumo y emisiones en operación sector residencial

- **Evaluación de consumo y emisiones asociadas a la operación de equipos domésticos**

Este modelo pretende cuantificar las emisiones de CO_2-eq anuales asociadas a la operación de los principales equipos domésticos (electrodomésticos y gasodomésticos), con base al consumo de energía respectivo a estos equipos. El consumo de energía anual para cada equipo también es estimado en el modelo desarrollado. Este modelo se desarrolla en función de la cantidad de unidades de vivienda de un proyecto de análisis.

El cálculo de emisiones de este modelo se fundamenta en la metodología IPCC utilizada en el *Second Assessment Report*, que es la metodología implementada en el inventario nacional de emisiones de Colombia. Este cálculo se resume en la siguiente expresión.

$$\mathrm{tCO_2 - eq} = \mathrm{tCO_2} + \mathrm{GWP_{CH_4}} * \mathrm{tCH_4} + \mathrm{GWP_{N_2O}} * \mathrm{tN_2O}$$

En dónde los valores de tCO_2, tCH_4, y tN_2O corresponden a las emisiones calculadas con base al consumo de energía y mediante los factores de emisión de las fuentes de energía. Para el modelo se tuvieron en cuenta como fuentes de energía la generación eléctrica y el gas natural genérico.

Los factores de emisión utilizados son los reportados por la UPME para energía eléctrica [202] y gas natural [203]. Se debe considerar que para electricidad en Colombia solo se cuantifican las emisiones de CO_2 [202], a diferencia del Gas Natural para el cual se cuantifican emisiones de CO_2, CH_4, y N_2O. La Tabla 150 presenta los factores utilizados de emisión y el GWP para cada gas emitido [204]. Los factores de emisión utilizados son los reportados por la UPME para energía eléctrica [202] y gas natural [203]. Se debe considerar que para electricidad en Colombia solo se cuantifican las emisiones de CO_2 [202], a diferencia del Gas Natural para el cual se cuantifican emisiones de CO_2, CH_4, y N_2O. La Tabla 150 presenta los factores utilizados de emisión y el GWP para cada gas emitido [204]. Los factores de emisión utilizados son los reportados por la UPME para energía eléctrica [202] y gas natural [203]. Se debe considerar que para electricidad en Colombia solo se cuantifican las emisiones de CO_2 [202], a diferencia del Gas Natural para el cual se cuantifican emisiones de CO_2, CH_4, y N_2O. La Tabla 150 presenta los factores utilizados de emisión y el GWP para cada gas emitido [204].

Tabla 150. Factores de emisión

Factores de emisión				
Fuente	**Emisión**	**Factor**	**Unidades**	**GWP**
Gas natural	**CO2**	55,539.11	kg/TJ	1
	CH4	1.000	kg/TJ	21
	N2O	0.100	kg/TJ	310
Electricidad	**CO2**	0.20959	tCO2/MWh	1

Fuente: Elaborado a partir de [203], [205]

La estimación del consumo de energía se realizó con base al informe de caracterización energética del sector residencial urbano y rural en Colombia [38] y el informe de estimación de consumos de subsistencia [89], con una corrección anual por disminución en la demanda debida al fenómeno de transición demográfica en el que anualmente disminuye la cantidad de habitantes por hogar, según la proyección del plan energético nacional 2020 – 2050 [46]. Para la evaluación del consumo de electricidad por iluminación se utilizaron los resultados de la serie de simulaciones energéticas ejecutadas para Ciudad Verde, para las cuales se consideran los efectos del entorno de las edificaciones de vivienda sobre el consumo en este uso.

Para aplicar el modelo al caso de estudio (Ciudad Verde) se utilizaron los valores obtenidos para las ciudades con altitud mayor a 2000 m.s.n.m., como es el caso de Soacha. Con base a este informe se decidió que en el modelo se evaluarían las emisiones y el consumo energético para los usos básicos: iluminación, refrigeración, cocción de alimentos, calentamiento de agua, lavado de ropa, televisión, planchado de ropa y uso de computadores. Así mismo se determinó un factor de consumo mensual por hogar para cada uno de los equipos de los usos definidos. Como se presenta en las Tabla 151 y

Tabla 152, estos usos representan en promedio el 94% del consumo de electricidad y el 100% del consumo de gas natural de los hogares para el piso térmico analizado.

Tabla 151. Caracterización del consumo por diferentes equipos eléctricos según estrato socioeconómico

Distribución del consumo energía electrodomésticos por estrato en hogares ubicados a más de 2000 msnm						
Factor	**Estrato**					
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Iluminación	19.65%	16.51%	12.62%	13.87%	27.42%	44.75%
Refrigeración	34.06%	38.63%	37.94%	40.22%	40.91%	20.30%
Lavadora	0.83%	2.30%	2.24%	2.85%	2.11%	2.44%
TV	16.95%	11.36%	14.86%	13.05%	9.99%	2.58%
Computador	2.57%	3.95%	4.69%	7.02%	6.57%	3.98%
Plancha	2.94%	2.90%	3.56%	4.48%	5.37%	3.40%
Licuadora	0.30%	0.40%	0.26%	0.28%	0.26%	0.12%
Otros	6.63%	7.26%	7.36%	7.94%	7.37%	21.85%
Ducha eléctrica	14.56%	15.62%	16.45%	7.47%	0.00%	0.00%
Estufa eléctrica	1.50%	0.45%	0.00%	2.85%	0.00%	0.58%
Calentador de agua eléctrico	0.00%	0.61%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Fuente: Elaborado a partir de [38]

Tabla 152. Caracterización del consumo por diferentes equipos a gas según estrato socioeconómico

Distribución del consumo gasodomésticos por estrato en hogares ubicados a más de 2000 msnm						
Factor	**Estrato**					
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Cocción alimentos	100.00%	100.00%	94.63%	91.50%	89.17%	80.96%
Calentamiento agua	0.00%	0.00%	5.37%	9.85%	10.83%	19.04%

Fuente: Elaborado a partir de [38]

Se estimó el consumo total de Ciudad Verde según cada equipo, con base al *stock* de vivienda para cada año de análisis. De la bibliografía consultada [38], [183] se definieron los factores de consumo de diferentes equipos a analizar. Adicionalmente, con base a la encuesta de calidad de vida del DANE [185] se definió un factor de tenencia por hogar para cada uno de los equipos o usos analizados (Tabla 153).

Tabla 153. Tasas de tenencia de equipos domésticos para Soacha en el año base [185]

Tasas de tenencia en Soacha (% de hogares)	
Nevera	91.25%
Estufa	96.94%
Iluminación	100%
Lavadora	84.16%
Calentador de agua	68.07%
Televisor	74.50%
Plancha	74.50%
Computador escritorio	38.00 %
Computador portatil	50.10%

Fuente: Elaborado a partir de [38], [185]

Sin embargo, dado que se proyecta el consumo y las emisiones en el periodo de estudio (2018 – 2030) se consideró el escenario de crecimiento económico definido en el marco fiscal de mediano plazo [47] para proyectar el aumento en la tenencia de los equipos evaluados con base a la relación entre el aumento del PIB y el aumento de la demanda de electricidad del sector residencial.

En la evaluación de la relación entre el crecimiento del PIB y el aumento de la demanda de electricidad del sector residencial se analizaron los datos históricos de estas dos variables en el periodo 1990 – 2000 [186]; con el fin de estimar una elasticidad de la demanda de electricidad del sector residencial. Para calcular el porcentaje de crecimiento de las variables en el tiempo se utilizó la tasa de crecimiento anual compuesto (CAGR). La Tabla 154 presenta los resultados de este proceso.

Tabla 154. Evaluación tasa de crecimiento histórica

Elasticidad demanda electricidad sector residencial						
Periodo	**CAGR Demanda electricidad**	**CAGR PIB**	**CAGR Población**	**CAGR PIB/pc**	**CAGR Intensidad energética**	$\frac{\text{CAGR Demanda electricidad}}{\text{CAGR PIBpc}}$
1990-2000	1.5%	2.7%	1.7%	1.0%	-1.2%	1.51
2000-2010	3.0%	4.0%	0.9%	3.2%	-1.0%	0.95
2010-2017	2.5%	3.9%	3.9%	3.4%	-1.3%	0.73

Según lo presentado, se toma 0.73 como el valor de la relación entre el crecimiento del PIB per cápita y la demanda de energía del sector residencial para el año base (2018) y se estima para el año 2030 que esta relación tome un valor de 0.60. Para asignar un valor de esta relación a cada año en el periodo de análisis se asignó el valor representativo a un decrecimiento lineal entre cada año. Así bien, al evaluar la relación para cada año en el escenario de crecimiento del PIB en Colombia [47] fue posible estimar el aumento de la demanda de electricidad del sector residencial; los resultados se presentan en la Tabla 41.

Tabla 155. Proyección del aumento de la demanda en el sector residencial

Año	**Elast**	**Crecimiento PIB** [47]	**PIB (Miles millones USD)**	**Población**	**PIB/pc (Millones USD)**	**CAGR PIBpc**	**CAGR demanda electricidad**
2018	0.73	2.60%	**$ 383.18**	48,258,494	$ 0.0079		
2019	0.72	3.60%	**$ 396.98**	48,698,399	$ 0.0082	2.664%	1.93%
2020	0.71	4.00%	**$ 412.85**	49,142,315	$ 0.0084	3.061%	2.18%
2021	0.70	4.20%	**$ 430.19**	49,590,276	$ 0.0087	3.259%	2.28%
2022	0.69	4.40%	**$ 449.12**	50,042,322	$ 0.0090	3.457%	2.38%
2023	0.68	4.30%	**$ 468.44**	50,498,488	$ 0.0093	3.358%	2.28%
2024	0.67	4.30%	**$ 488.58**	50,958,812	$ 0.0096	3.358%	2.24%
2025	0.66	4.30%	**$ 509.59**	51,423,332	$ 0.0099	3.358%	2.20%
2026	0.64	4.10%	**$ 530.48**	51,892,087	$ 0.0102	3.160%	2.04%
2027	0.63	4.00%	**$ 551.70**	52,365,114	$ 0.0105	3.061%	1.94%
2028	0.62	4.00%	**$ 573.77**	52,842,454	$ 0.0109	3.061%	1.90%
2029	0.61	4.00%	**$ 596.72**	53,324,145	$ 0.0112	3.061%	1.87%

2030	0.60	4.00%	**$ 620.59**	53,810,226	$ 0.0115	3.061%	1.84%

Con esta proyección del aumento de la demanda se proyectó la tasa de tenencia de los equipos para cada año en el periodo de análisis, y se obtuvieron los valores presentados en la Tabla 156.

Tabla 156. Proyección tasas de tenencia de equipos domésticos

Valores tenencia en Soacha - CV // Proyección según aumento del PIB Colombia									
Año	**Nevera**	**Estufa**	**Iluminación**	**Lavadora**	**Calentador de agua**	**Televisor**	**Plancha**	**Computador Escritorio**	**Computador portatil**
2018	**91.25%**	**96.94%**	**100%**	**84.16%**	**68.07%**	**74.50%**	**74.50%**	**38.00%**	**50.10%**
2019	93.01%	98.81%	100%	85.78%	69.38%	75.93%	75.93%	38.73%	51.06%
2020	95.03%	100.00%	100%	87.65%	70.89%	77.59%	77.59%	39.58%	52.18%
2021	97.20%	100.00%	100%	89.65%	72.51%	79.36%	79.36%	40.48%	53.37%
2022	99.52%	100.00%	100%	91.79%	74.24%	81.25%	81.25%	41.44%	54.64%
2023	100.00%	100.00%	100%	93.88%	75.93%	83.10%	83.10%	42.39%	55.88%
2024	100.00%	100.00%	100%	95.98%	77.63%	84.96%	84.96%	43.34%	57.14%
2025	100.00%	100.00%	100%	98.09%	79.34%	86.83%	86.83%	44.29%	58.39%
2026	100.00%	100.00%	100%	100.00%	80.95%	88.60%	88.60%	45.19%	59.58%
2027	100.00%	100.00%	100%	100.00%	82.52%	90.32%	90.32%	46.07%	60.74%
2028	100.00%	100.00%	100%	100.00%	84.10%	92.04%	92.04%	46.95%	61.90%
2029	100.00%	100.00%	100%	100.00%	85.67%	93.76%	93.76%	47.82%	63.05%
2030	100.00%	100.00%	100%	100.00%	87.24%	95.48%	95.48%	48.70%	64.21%

Finalmente, el consumo anual por cada equipo (en kWh o m^3) corresponde a:

$$\text{Consumo}_{\text{año i}_{\text{equipo j}}} = \text{Stock vivienda}_{\text{año i}} * \text{Tasa tenencia}_{\text{año i}_{\text{equipo j}}} * \text{Consumo promedio}_{\text{año i}_{\text{equipo j}}}$$

De esta forma se obtienen todos los valores necesarios para cuantificar las emisiones de gases efecto invernadero asociadas a la operación de los principales equipos domésticos en Ciudad Verde.

Para adaptar esta metodología al caso de Lagos de Torca, se debió extender el escenario de proyección de las tasas de tenencia de equipos domésticos hasta el año 2050, debido a que es el año en el que se espera que se finalice la construcción de vivienda para este caso. De esta forma, aplicando las mismas tasas descritas previamente hacia esta nueva ventana de tiempo, se llegó a las tasas de tenencia desde 2031 hasta 2050 que se presentan en la Tabla 157.

Tabla 157. Proyección tasas de tenencia de equipos domésticos 2031 - 2050

Valores tenencia en Lagos de Torca // Proyección según aumento del PIB Colombia									
Año	**Nevera**	**Estufa**	**Iluminación**	**Lavadora**	**Calentador de agua**	**Televisor**	**Plancha**	**Computador Escritorio**	**Computador portatil**
2031	100.00%	100.00%	100%	100.00%	88.81%	97.20%	97.20%	49.58%	65.37%
2032	100.00%	100.00%	100%	100.00%	90.45%	98.99%	98.99%	50.49%	66.57%
2033	100.00%	100.00%	100%	100.00%	92.11%	100.00%	100.00%	51.42%	67.79%
2034	100.00%	100.00%	100%	100.00%	93.80%	100.00%	100.00%	52.36%	69.04%
2035	100.00%	100.00%	100%	100.00%	95.52%	100.00%	100.00%	53.32%	70.30%
2036	100.00%	100.00%	100%	100.00%	97.27%	100.00%	100.00%	54.30%	71.59%
2037	100.00%	100.00%	100%	100.00%	99.06%	100.00%	100.00%	55.30%	72.91%
2038	100.00%	100.00%	100%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	56.32%	74.25%
2039	100.00%	100.00%	100%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	57.35%	75.61%

2040	100.00%	100.00%	100%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	58.40%	77.00%
2041	100.00%	100.00%	100%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	59.48%	78.41%
2042	100.00%	100.00%	100%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	60.57%	79.85%
2043	100.00%	100.00%	100%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	61.68%	81.32%
2044	100.00%	100.00%	100%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	62.81%	82.81%
2045	100.00%	100.00%	100%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	63.97%	84.33%
2046	100.00%	100.00%	100%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	65.14%	85.88%
2047	100.00%	100.00%	100%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	66.34%	87.46%
2048	100.00%	100.00%	100%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	67.55%	89.07%
2049	100.00%	100.00%	100%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	68.80%	90.70%
2050	100.00%	100.00%	100%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	70.06%	92.37%

Anexo 8. Metodología de evaluación de consumo y emisiones en operación sector no residencial

Las emisiones asociadas a este sector corresponden a las emisiones provenientes de edificaciones como centros comerciales, colegios, hospitales y oficinas. Para el caso de Ciudad Verde se evaluaron los equipamientos contenidos en la Tabla 158. Esta información se distribuye de la siguiente manera: año de entrada en operación, nombre del equipamiento, tipología de la edificación y área construida.

Tabla 158. Equipamientos no residenciales en Ciudad Verde

Año	**Equipamiento**	**Tipología**	**Área construida (m^2)**
2012	CC Miraflores	Comercio	5,740
2014	CC Prado Verde	Comercio	5,524
2018	CC Jardín Verde	Comercio	7,338
2012	Colegio Minuto de Dios	Colegio	5,978
2014	Centro Infantil	Colegio	6,272
2014	Colegio La Despensa	Colegio	12,086
2014	Biblioteca Ciudad Verde	Colegio	356
2015	Colegio Chiloé	Colegio	6,334
2017	Colegio Brighton	Colegio	8,446
2012	CRIT Teletón	Salud	2,377
2012	Patio de buses	Oficina	345
2013	CAI	Oficina	58
2017	Estación de Policía	Oficina	1,158
2017	Iglesia Católica	Oficina	345
2020	Nuevo Colegio	Colegio	7,786
2022	Nuevo Hospital	Salud	25,451

A partir de los datos anteriores y con base en el ejercicio de observación llevado a cabo en la visita de campo al macroproyecto, se desarrollaron simulaciones energéticas primarias utilizando la aplicación EDGE APP [206] de la Corporación Financiera Internacional (IFC por sus siglas en inglés). Para cada una de las tipologías (Comercio, Colegio y Salud) se modeló una edificación representativa con el objetivo de calcular el consumo energético, para luego, cuantificar las emisiones producidas durante la etapa de operación. En el caso de la tipología Oficina se partió del consumo de electricidad obtenido como resultado de las modelaciones del Programa BEA.

Para la modelación de la tipología Comercio se utilizó el módulo con el mismo nombre en la aplicación. La información introducida en la sección de parámetros básicos y datos del edificio se presenta en la Tabla 159 y Tabla 160, respectivamente.

Tabla 159. Parámetros básicos tipología Comercio

Parámetro	Opción
Tipo de tienda minorista	Centro comercial
Área del terreno (m^2)	6,600
Estacionamiento	Estacionamiento al aire libre
Supermercado	Activado

Tabla 160. Datos del edificio tipología Comercio

Dato	Opción
Número de pisos en altura	1
Número de sótanos	0
Altura entrepiso (m)	4
Área interna bruta (m^2)	6,200

Adicionalmente, el diseño de la tipología contempla la inclusión de un sistema de aire acondicionado dimensionada directamente por la aplicación. Los parámetros de modelación restantes se dejaron por defecto para el tipo de tienda minorista seleccionado.

La modelación tipología Colegio utilizó el módulo de Educación en la aplicación. La información introducida en la sección de parámetros básicos y datos del edificio se presenta en la Tabla 161.

Tabla 161. Parámetros básicos y datos del edificio tipología Colegio

Parámetro	Opción
Tipo de establecimiento educativo	Colegio
Número de pisos en altura	4
Número de sótanos	1
Altura entrepiso (m)	4
Área interna bruta (m^2)	7,800

Adicionalmente, el diseño de la tipología no contempla la inclusión de ningún sistema mecanizado para asegurar el confort. Los parámetros de modelación restantes se dejaron por defecto para el tipo de establecimiento educativo seleccionado.

Por último, la modelación de la tipología Salud utilizó el módulo de Hospitales en la aplicación. La información introducida en la sección de parámetros básicos y datos del edificio se presenta en la Tabla 162 y Tabla 163, respectivamente.

Tabla 162. Parámetros básicos tipología Salud

Parámetro	Opción
Tipo de hospital	Hospital público
Tasa promedio de ocupación (%)	70
Lavandería	Activado
Cocina	Activado

Tabla 163. Datos del edificio tipología Salud

Parámetro	Opción
Número de pisos en altura	7
Número de sótanos	1
Altura entrepiso (m)	4
Número de camas	312

Adicionalmente, el diseño de la tipología contempla la inclusión de un sistema de aire acondicionado. Los parámetros de modelación restantes se dejaron por defecto para el tipo de hospital seleccionado.

Anexo 9. Metodología y fuentes de información para cálculo del carbono incorporado

La metodología de análisis utilizado se basa en la normativa europea EN 15978. En ese documento normativo se establece la metodología de evaluación ambiental de las edificaciones a lo largo del ciclo de vida. Como el análisis del modelo se centra en el carbono incorporado de las edificaciones, el alcance de la metodología utilizada se limita a las primeras etapas del ciclo de vida y por ello solo se incluyen los módulos A1 – A5 especificados en la normativa.

El cálculo del carbono incorporado requiere tres fuentes de información: primero, una caracterización del área construida; segundo, la determinación de las cantidades de obra de los prototipos que se van a utilizar; y tercero, la identificación (o el cálculo) de los diferentes factores de emisión utilizados.

En la primera etapa se caracteriza el área construida según su tipología y sistema constructivo. Las edificaciones residenciales corresponden a la tipología VIS y VIP y el resumen de las áreas construidas según su sistema constructivo se presenta en la Tabla 164 . Las edificaciones no residenciales se definen como parte del sistema constructivo Mampostería Estructural y el resumen de las áreas construidas según su tipología se presenta en la Tabla 165. Estas tablas fueron elaboradas a partir de información del flujo de venta de viviendas suministrado por el desarrollador del proyecto, información general suministrada por diferentes constructoras y del Censo de Edificaciones (CEED).

Tabla 164. Áreas construidas residenciales según sistema constructivo.

Residencial				
Año	Mampostería Confinada (m2)	Mampostería Estructural (m2)	Sistema Industrializado (m2)	Total (m2)
2018	3, 322	144, 963	91, 611	239, 897
2019	2, 266	98, 876	62, 485	163, 627
2020	2, 485	108, 418	68, 516	179, 418
2021	2, 485	108, 418	68, 516	179, 418
2022	2, 485	108, 418	68, 516	179, 418
2023	1, 139	49, 708	31, 414	82, 261
2024	0	0	0	0
2025	0	0	0	0
2026	0	0	0	0
2027	0	0	0	0
2028	0	0	0	0

2029	0	0	0	0
2030	0	0	0	0
Total (m2)	14, 181	618, 801	391, 058	10, 24040

Tabla 165. Áreas construidas no residenciales según tipología

No residencial				
Año	Educativo (m2)	Salud (m2)	Otros (m2)	Total (m2)
2018	0	0	3, 669	3, 669
2019	3, 893	6, 363	0	10, 256
2020	3, 893	6, 363	0	10, 256
2021	0	6, 363	0	6, 363
2022	0	6, 363	0	6, 363
2023	0	0	0	0
2024	0	0	0	0
2025	0	0	0	0
2026	0	0	0	0
2027	0	0	0	0
2028	0	0	0	0
2029	0	0	0	0
2030	0	0	0	0
Total (m2)	7, 786	25, 451	3, 669	36, 906

En la segunda etapa se le asigna a cada una de las áreas caracterizadas una cuantía de material (kg/m2 construidos). Se evalúan cinco materiales: cemento, acero, ladrillo, vidrio y agregados. Los datos correspondientes se sintetizan en la Tabla 166. Respecto a las áreas residenciales, las cantidades fueron determinadas a partir de planos arquitectónicos y estructurales de dos conjuntos residenciales construidos en Ciudad Verde. Las áreas no residenciales, por otra parte, fueron determinadas a partir de presupuestos de obra establecidos en licitaciones públicas.

Tabla 166. Cantidades de material utilizadas según tipología edilicia y sistema constructivo

Consumo de material							
Tipología	**Sistema constructivo**	**Cemento (kg/m2)**	**Acero (kg/m2)**	**Ladrillo (kg/m2)**	**Vidrio (kg/m2)**	**Agregados - Arena (kg/m2)**	**Agregados - Grava (kg/m2)**
VIS y VIP	Mampostería Estructural	95.1	32.5	143.5	2.1	263.8	336.3
	Sistema Industrializado	122.8	15.5	41.6	1.9	314.7	447.9
Educativo	Mampostería Confinada	161.1	24.6	85.2	2.9	400.7	475.1
Salud		210.4	53.2	172.3	5.0	489.5	606.9
Otros		185.8	38.9	128.7	3.9	445.1	541.0

*Nota: las cantidades de material utilizadas en edificaciones residenciales construidas mediante el sistema constructivo ‘Mampostería Confinada’ se asumen como iguales a las del sistema ‘Mampostería Estructural’.

En la tercera etapa se definen los factores de emisión asociados a la etapa de producto (Tabla 167), a la etapa de transporte (Tablas Tabla 168 y Tabla 169) y a la etapa de construcción (Tabla 170).

Tabla 167. Factores de emisión asociados a la etapa de producto

Factores de emisión		
Material	**Emisiones etapa (tCO_2-eq/t)**	**Referencia**
Cemento	1.137	[39]
Acero	1.990	[155]
Ladrillo	0.217	[39]
Vidrio	1.589	[39]
Agregados - Arena	0	[39]
Agregados - Grava	0.0025	[39]

Tabla 168. Factores de emisión por transporte de materiales desde la fábrica hasta la obra

Factores de emisión por transporte materiales			
Material	**Distancia (km)**	**Emisiones totales (tCO2e/t)**	**Referencia**
Cemento	29.9	0.0082601	-
Acero	38.0	0.010	-
Ladrillo	21.7	0.0059854	[276]
Vidrio	13.9	0.004	-
Agregados – Arena	62	0.017128	[276]
Agregados – Grava	62	0.017128	[276]

*Nota: las distancias del cemento, acero y vidrio fueron determinadas a partir del cálculo de la distancia promedio entre las principales fabricas del material ubicadas dentro de un radio de 100km y Ciudad Verde.

Tabla 169. Factores de emisión por transporte de maquinaria

Factores de emisión por transporte de maquinaria		
Equipo	**Distancia (km)**	**Emisiones totales (tCO2e/m2)**
Grúa	3.4	6.E-07

Tabla 170. Factores de emisión durante la etapa de construcción

Emisiones durante la etapa de la construcción	
Sistema constructivo	**Emisiones totales (tCO2e/m2)**
Mampostería Confinada	0.008697
Mampostería Estructural	0.005991
Sistema Industrializado	0.023751

Para el caso de Lagos de Torca se definen tres prototipos de edificaciones residenciales: uno VIP, no VIS y uno No VIS. Respecto a la caracterización de áreas, a partir de los escenarios de urbanización planteados se formulan los siguientes datos:

Tabla 171. Áreas construidas residenciales según prototipo (Lagos de Torca)

Cuadro de áreas

Año	VIP	VIS	No VIS	Total
2020	0	0	0	0
2021	0	0	0	0
2022	0	0	0	0
2023	15,313	17,759	67,830	103,554
2024	41,389	47,998	183,400	383,510
2025	79,791	92,531	353,500	923,153
2026	84,532	98,029	374,360	1,494,710
2027	78,511	91,047	347,830	2,025,696
2028	69,171	80,216	306,390	2,493,451
2029	69,171	80,216	306,390	2,961,207
2030	69,171	80,216	306,390	3,428,962
2031	91,738	106,386	406,140	4,049,105
2032	73,343	85,054	324,870	4,545,074
2033	60,068	69,660	266,140	4,951,346
2034	60,068	69,660	265,930	5,357,401
2035	60,021	69,605	266,070	5,763,499
2036	44,755	51,901	198,310	6,066,218
2037	44,755	51,901	198,100	6,368,719
2038	44,708	51,846	198,170	6,671,190
2039	40,014	46,403	177,240	6,941,776
2040	40,014	46,403	177,240	7,212,363
2041	40,014	46,403	177,240	7,482,949
2042	38,212	44,314	169,120	7,741,208
2043	22,567	26,170	99,960	7,893,813
2044	22,520	26,116	99,890	8,046,243
2045	22,567	26,170	99,750	8,198,631
2046	22,520	26,116	99,890	8,351,061
2047	22,567	26,170	99,750	8,503,449
2048	22,520	26,116	99,890	8,655,879
2049	47	55	70	8,656,055
2050	0	0	0	8,656,055
Total	1,280,070	1,484,460	5,669,860	8,434,390

Con base en la información utilizada para Ciudad Verde y presupuestos de obra de viviendas no VIS se definen las siguientes cuantías de material:

Tabla 172. Cantidades de material utilizadas según tipología prototipo (Lagos de Torca)

Consumo de material							
Tipología	**Características**	**Cemento (kg/m2)**	**Acero (kg/m2)**	**Ladrillo (kg/m2)**	**Vidrio (kg/m2)**	**Agregados - Arena (kg/m2)**	**Agregados - Grava (kg/m2)**
Residencial	VIP (Mampostería Estructural)	95.1	32.5	143.5	2.1	263.8	336.3
	VIS (Sistema Industrializado)	176.1	27.6	41.6	1.9	431.1	679.9
	No VIS (Sistema Industrializado)	194.7	38.2	60.4	1.9	379.5	531.0

Anexo 10. Metodología para la evaluación de medidas de mitigación en Ciudad Verde Sector Manejo Integrado del Agua

- ***Manejo de la demanda***

Las estrategias para la reducción de la demanda se evalúan a partir de WaterMet^2. Para esto se determinaron las características del consumo de agua en el área. Posteriormente, para cada medida se evaluaron los cambios correspondientes en los flujos de agua potable suministrada, la escorrentía generada y el agua residual, los cuales están asociados a emisiones por tratamiento, bombeo y descomposición de la materia orgánica. A su vez, para las medidas planteadas se cuantificaron emisiones de $CO_{2\text{-}eq}$ que pueden generarse por la operación de estas. Las etapas consideradas para cada medida se resumen en la Tabla 173. Cabe anotar que puede haber emisiones adicionales que no se cuantificaron, las cuales están asociadas a los residuos de elementos reemplazados y a la manufactura de los elementos y sistemas propuestos. En las siguientes secciones se presenta la información empleada para el modelo y el análisis de las medidas.

Tabla 173. Aspectos considerados en la evaluación de la Mitigación de CO_{2e}

Medidas	**Mitigación de CO_{2e}**			**Emisiones de CO_{2e}**
	Suministro	**Manejo de agua pluvial**	**Manejo de agua residual**	
Elementos eficientes	X		X	
Uso de aguas grises	X		X	Bombeo de agua
Aprovechamiento de agua lluvia	X	X		Bombeo de agua

Tabla 174. Costos y beneficios incluidos

Medidas	**Beneficios**	**Costos**	
	Reducción uso de agua potable	**Capital**	**Uso de energía eléctrica**
Elementos eficientes	Tarifa de agua potable y alcantarillado[1]	Equipo e instalación	
Uso de aguas grises	Tarifa de agua potable y alcantarillado[1]	Equipo y tuberías requeridas por vivienda	Tarifa energía eléctrica
Aprovechamiento de agua lluvia	Tarifa de agua potable y alcantarillado[1]	Equipo y tuberías requeridas por vivienda	Tarifa energía eléctrica

[1]Estimada a partir de tarifas EAB para Bogotá y Soacha 2017-2019

a. Caracterización demanda: Modelo WaterMet^2

Para la aplicación del modelo WaterMet^2 se consideraron las características actuales de las áreas privadas, así como el crecimiento de viviendas proyectado hasta el año 2023. Se definieron 41 áreas locales correspondientes a las manzanas que componen el macroproyecto. En cada caso, se asignaron valores de área total, número de propiedades, consumo de agua residencial, comercial e institucional, superficie del suelo, coeficiente de escorrentía y coeficiente de infiltración. Como datos generales de Ciudad Verdes se incluyó la distribución de uso de agua potable e información meteorológica.

De acuerdo con la información disponible para el año 2018 se estableció una demanda per-cápita para cada manzana. De esta manera se definió un promedio mínimo de 41.82 l/hab/día y máximo de 64.83 l/hab/día. Los porcentajes para los usos finales de agua residencial se distribuyeron como se indica a continuación: 3.7% para lavamanos, 9% para lavadero, 19.4% para lavaplatos, 27.1% para lavadora, 20.9% para la ducha y 19.9% para el sanitario [7]. La información meteorológica empleada corresponde

al periodo 2006-2018 de las estaciones las Huertas, Kennedy e INEM Kennedy las cuales pertenecen a la EAB, el IDEAM y la Red de Calidad del Aire.[7].

Se definieron áreas verdes, áreas impermeables y áreas de techos de acuerdo con la información satelital y geográfica disponible hasta el año 2019 [207], [208]. A partir de esta caracterización se estimó una proporción de las superficies analizadas para los paramentos no construidos o sobre los que no había información disponible. Los cambios en la proporción de las superficies analizadas se presentan en la Tabla 175. El coeficiente de escorrentía se estableció para a partir de un valor de 0.85 para zonas impermeables techos, y de 0.2 para zonas permeables, según lo recomendado por la norma técnica NS-085 de la EAB-ESP y por Butler & Davies [10]. El coeficiente de infiltración se estableció a partir de la proporción de áreas verdes y los valores recomendados por Schosinsky & Losilla [209].

Tabla 175. Distribución de las áreas de los paramentos

Tipo de área	2018	2019	2020	2021	2022	2023 -2030
Áreas verdes	45%	45%	39%	34%	28%	22%
Áreas impermeables	31%	31%	35%	39%	41%	44%
Techos	24%	24%	26%	27%	31%	34%

b. Equipos eficientes

La evaluación del desempeño de los equipos eficientes se hizo a partir de la proporción de vivienda VIP, VIS y tope VIS. A su vez, el tipo de equipos utilizados en Ciudad Verde se estimó a partir de los equipos típicamente usados en unidades de vivienda tipo VIS, VIP y estrato 3 presentados en el estudio del BEA para establecer bases técnicas para implementar la resolución 549 de 2014 [95], como se presenta en la Tabla 176. Adicionalmente, en esta tabla se resumen las medidas eficientes seleccionadas para generar un ahorro de agua potable, la cual se hace a partir de las recomendaciones del BEA. Particularmente para vivienda VIS y tope VIS se realizó un ajuste en el crecimiento estimado del consumo, considerando que los sanitarios disponibles en el mercado tienen un menor consumo al reportado en el estudio del BEA (i.e., 6/4 lpd). Se consideró que este tipo de equipos se instalarían para la vivienda nueva desde el 2020.

Tabla 176. Características equipos evaluados

Ítem	Características equipos			Equipos eficientes
	VIP[1]	VIS[1]	Tope VIS[1]	Todas las unidades residenciales[1]
Ducha ahorradora	9.6 lpm	9.6 lpm	9.6 lpm	6 lpm a 60 PSI
Sanitario descarga dual	6 lpd	6 lpd/ 4.8 lpd	6 lpd/ 4.8 lpd	4.8 lpd/ 3.2 lpd
Lavaplatos	8.3 lpm	8.3 lpm	8.3 lpm	6 lpm a 60 PSI
Lavamanos privado	9.6 lpm	9.6 lpm	8.3 lpm	6 lpm a 60 PSI

[1][95], lmp = Litros por minuto, lpd = Litros por descarga, PSI = Libra de fuerza por pulgada cuadrada.

Las características de la lavadora corresponden a la lavadora seleccionada por su eficiencia energética, la cual tiene una capacidad de 19 Kg y un consumo de agua de 160 l/ciclo. Dado que no se cuenta con información sobre el consumo de agua de las lavadoras existentes en Ciudad Verde, esta se aproximó a partir de las características sobre tenencia y consumo de energía para hogares en ciudades sobre 2000 m.s.n.m. presentadas por la UPME & Consorcio Corpoema-Cusa [38]. Por este motivo se evaluó consumo de lavadoras comerciales con carga de 9 a 12 kg y un consumo de energía para ocho ciclos entre 3 y 4 kWh. Finalmente, se estimó un consumo de 11.94 l/kg para las lavadoras características del área y de 8.4 l/kg para el modelo propuesto. Los costos considerados para los elementos propuestos incluyen la adquisición del equipo y, en los casos en que el costo es significativo, se incluye costo de instalación. Estos datos se resumen en la Tabla 177. Para el caso de viviendas nuevas a partir del 2021, se considera

como costo la diferencia entre el equipo convencional y el ahorrador. Si el equipo convencional costaba más que el ahorrador se asumió un costo cero para no sobreestimar la costo eficiencia de la medida.

Tabla 177. Costos medidas propuestas (año 2019)

Equipo	Equipos por vivienda	Valor unitario (COP)[1]	Instalación (COP)	Fuente
Ducha ahorradora	2	92255.8	24461	[210][211]
Sanitario descarga dual	2	275997.8	82081	[212][211]
Aireador (lavaplatos)	1	28186.6	0	[213]
Aireador (lavamanos)	2	28186.6	0	[213]
Ducha convencional	2	81353.1[2]	24461	[214]–[216][211]
Sanitario convencional	2	368439.8[2]	82081	[217]–[219][211]

[1]Valores ajustados de acuerdo con la inflación. [2]Valor promedio

c. Reúso de aguas grises y aprovechamiento de agua lluvia

El análisis del reúso de aguas grises se hace considerando un sistema prefabricado de ALOAQUA [220] que está en capacidad de tratar y almacenar 500 l, incluye una membrana de filtración, así como una bomba con una entrada de energía de 90 W y un caudal máximo de 10 l/min. La evaluación de sistemas para el aprovechamiento de agua lluvia incluye dos sistemas prefabricados de 1500 l y 5000 l con tratamiento a partir de membranas [221], [222]. Los costos se resumen en la Tabla 178, los costos correspondientes a envío, nacionalización e impuestos no son considerados.

Tabla 178. Costos sistemas para reúso de aguas grises y aprovechamiento de agua lluvia (año 2019)

Equipo	Valor unitario (COP)[1]	Fuente
Sistema aguas grises (500 l)	$ 16,700,140.13	[220]
Sistema aprovechamiento agua lluvia (1500 l)	275997.8	[221]
Sistema aprovechamiento agua lluvia (5000 l)	28186.6	[222]
Tuberías ½” de 6 m	$ 14,545.28	[223]

[1]Valores ajustados de acuerdo con la inflación [224].

De acuerdo con la encuesta realizada en Ciudad Verde se considera un porcentaje de agua gris y agua lluvia empleada en las viviendas. Este valor se emplea para modificar el consumo per-cápita promedio en las áreas locales consideradas de acuerdo con las etapas definidas en la encuesta. Los valores se resumen en la Tabla 179. El análisis de los sistemas para reúso de aguas grises se hace bajo el supuesto de que debe suplir la totalidad del uso de agua lluvia y aguas grises actual. En cuanto al sistema de aprovechamiento de agua lluvia, la evaluación se hace considerando que se debe suplir el aprovechamiento actual de agua lluvia.

Tabla 179. Uso de agua gris y agua lluvia estimado en Ciudad Verde

Etapas	Uso de agua lluvia y agua gris	Agua lluvia	Agua gris
Etapa 1	21.19%	0.52%	20.67%
Etapa 2	17.38%	0.00%	17.38%
Etapa 3	17.09%	0.31%	16.78%
Etapa 4	18.64%	0.55%	18.09%
Etapa 5	21.99%	0.00%	21.99%
Etapa 6	25.23%	0.80%	24.43%
Etapa 7	23.54%	0.60%	22.94%
Promedio	20.97%	0.41%	20.56%

- ***Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible***

La metodología propuesta permite seleccionar la ubicación y la tipología de SUDS más adecuada para un área en una escala zonal, de acuerdo con sus necesidades respecto a los servicios ecosistémicos de provisión, regulación y socioculturales. Esta metodología está basada en el enfoque propuesto por Jiménez Ariza et al. [225] considerando el componente de servicios ecosistémicos. De esta manera,

cada área presenta diferentes requerimientos de acuerdo con el tipo de espacio público (p.ej. parques o separadores), los usos de las áreas construidas (p.ej. residencial o comercial), así como la densidad de población. Los espacios potenciales para la implementación de SUDS se clasifican de acuerdo con las características del espacio público (i.e. tamaño y escala). Finalmente, se define una jerarquía para la implementación de SUDS de acuerdo con los servicios ecosistémicos para los que se haya establecido que el área es prioritaria.

Las tipologías de SUDS que se tienen en cuenta para la evaluación corresponden a alcorques inundables, cuenca seca de drenaje extendido, cunetas verdes, zonas de bioretención, humedales construidos, pondajes húmedos, pavimentos permeables y zanjas de infiltración. La Figura 127 resume los pasos de la metodología planteada, la información requerida y los resultados esperados.

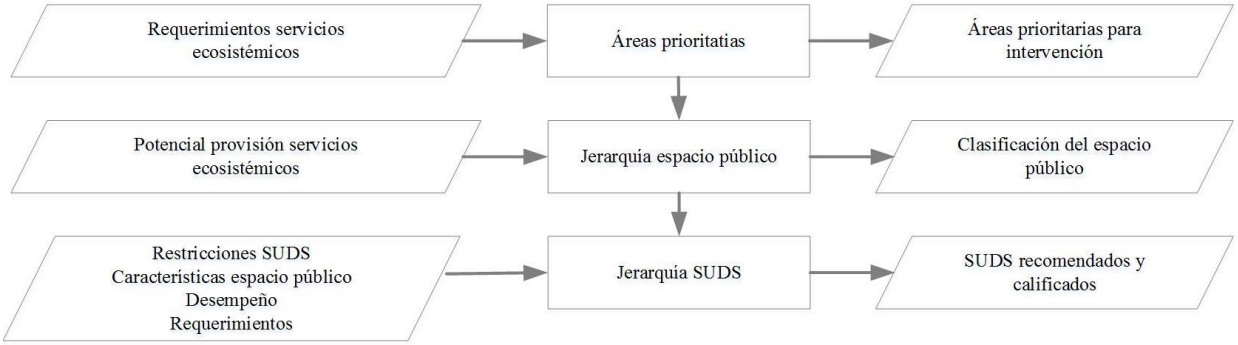


Figura 127. Metodología propuesta para la selección de tipologías de SUDS en una escala zonal

Paso 1:

En primer lugar, se identifican las áreas que presentan mayor déficit de servicios ecosistémicos y, por lo tanto, demandan una intervención. Los parámetros para evaluar cada servicio se definen a partir de los problemas ligados a la ausencia de un servicio ecosistémico y a las necesidades del área según las características de la población presente. Los parámetros analizados en cada servicio se presentan en la Figura 128. Es necesario aclarar que la selección de los parámetros depende de la información disponible y de la ciudad.

Dado que el servicio de provisión se requiere en zonas con altas necesidades de riego, se priorizan las áreas con mayor cantidad de zonas verdes. Los servicios de regulación se requieren en áreas con problemas relacionados con la calidad y la cantidad de la escorrentía y otros factores como la calidad del aire. Por lo tanto, se priorizan zonas con mayores áreas impermeables que presentan problemas de sobrecarga del sistema de drenaje, áreas más cercanas a los ríos, las cuales poseen mayor amenaza por inundación, y zonas con usos mixtos, donde la calidad de la escorrentía está más deteriorada. Respecto a los servicios socioculturales, éstos se requieren en sectores con mayor densidad de población, en zonas con presencia de población vulnerable (i.e., según la edad y los ingresos) o en sitios donde la población no tenga acceso directo a un parque.

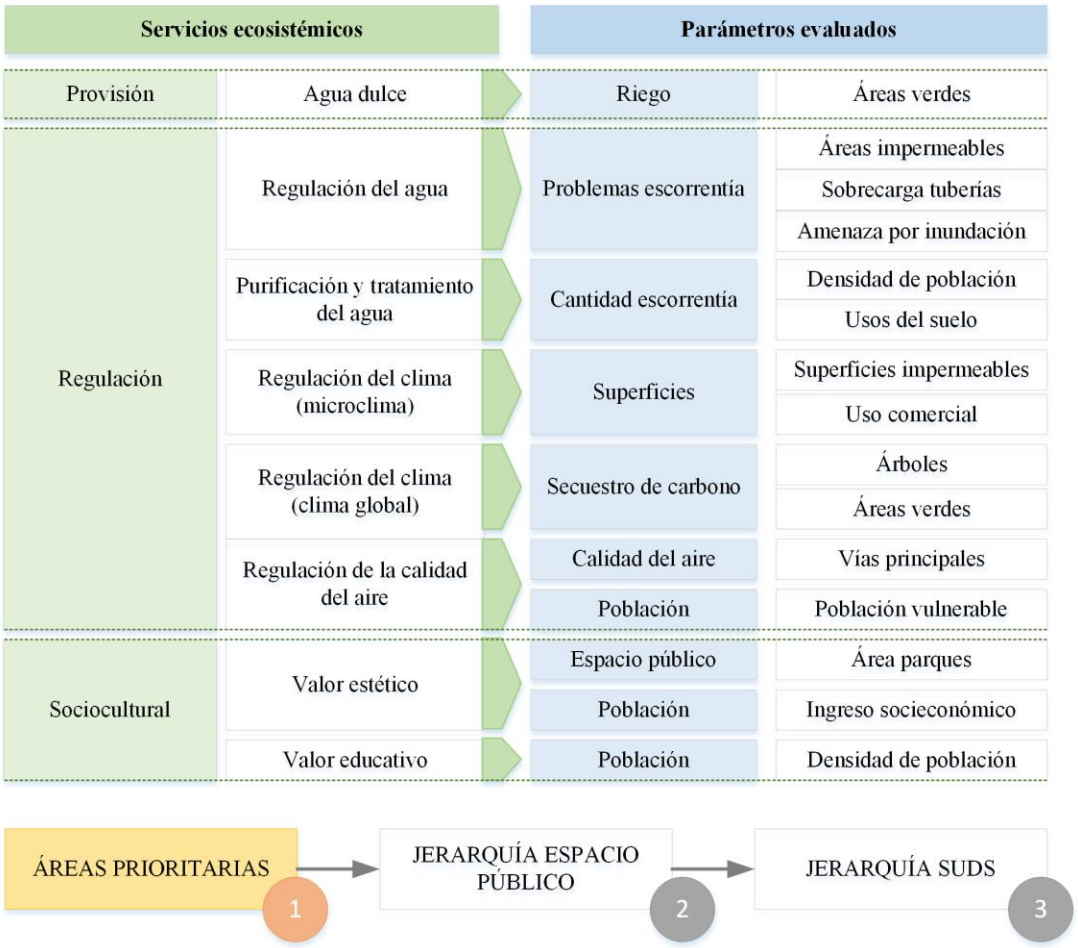


Figura 128. Priorización de áreas de acuerdo al déficit de servicios ecosistémicos

La evaluación de los servicios ecosistémicos mencionados anteriormente permite generar un índice cualitativo para las áreas e identificar las zonas prioritarias. La evaluación de los servicios ecosistémicos mencionados anteriormente permite generar un índice cualitativo para las áreas e identificar las zonas prioritarias. La relevancia de cada servicio en el cálculo del índice de priorización depende del juicio de los tomadores de decisiones y expertos. En este caso, para cada servicio ecosistémico se definió un índice normalizado de cero a uno. Dichos índices se estimaron al restar el valor más bajo al valor obtenido y dividir por el rango de valores de cada parámetro. Para la distancia a parques, por ejemplo, el valor se calculó como uno menos el índice normalizado, pues un valor mayor representa la mejor condición. Para la cuantificación del índice de priorización se usa el promedio de dos métodos de ponderación objetiva: (1) método de entropía [226] y (2) importancia de los criterios a través de su correlación (CRITIC) [227].

Paso 2:

En segundo lugar, se identifican las áreas del espacio público con mayor potencial para proveer servicios ecosistémicos y donde la implementación de SUDS genera mayores beneficios a la población. El tipo de espacio público que se incluye en el análisis contempla parques, plazas, separadores viales, andenes, vías, ciclorutas, rondas de río y franjas de control ambiental. Los parámetros para evaluar cada servicio (ver la Figura 129) se definen a partir de las características del entorno. Respecto al servicio de provisión, se seleccionó la calidad de la escorrentía como el parámetro de evaluación debido a que áreas con mejor calidad podrán proveer un mayor volumen de agua. Para los servicios de regulación, se eligió la tasa de

infiltración y el área disponible de vegetación pues si se tienen valores más altos de dichos parámetros mayor es el volumen de escorrentía manejado en el sitio.

En relación con los servicios socioculturales, para el valor estético se seleccionó el área disponible de vegetación y el tipo de espacio público. Específicamente, se prefieren áreas públicas en donde se puedan implementar tipologías con vegetación y/o con un espejo permanente de agua pues proveen mayor amenidad. Así mismo, para el valor educativo se escogió la infraestructura clave (p.ej. bibliotecas, centros comerciales o iglesias) y el tráfico peatonal ya que las tipologías instaladas en áreas con mayor afluencia de personas tienen mayor probabilidad de generar conocimiento.

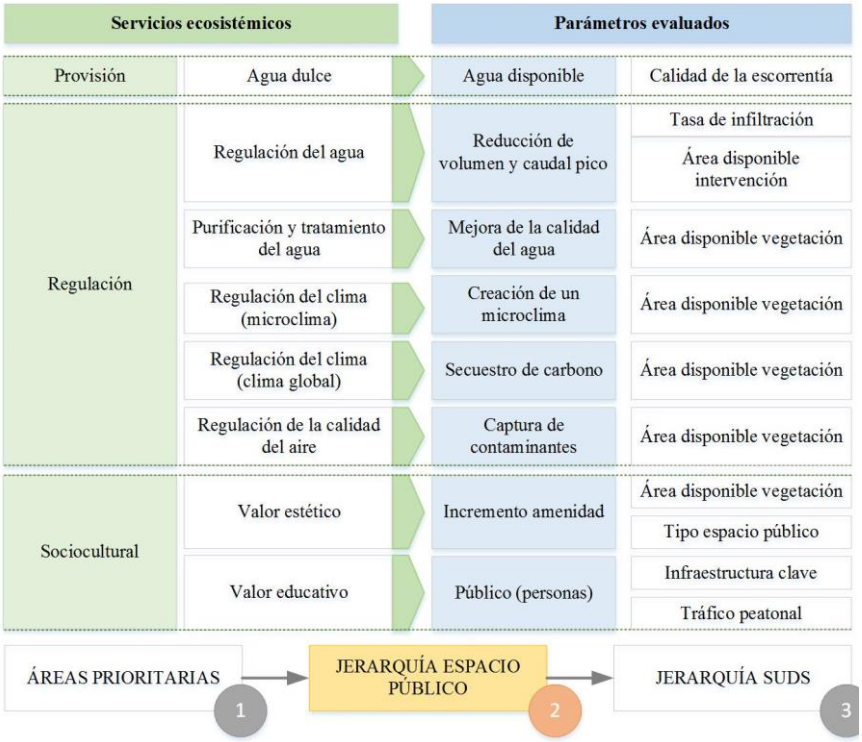


Figura 129. Jerarquía de aplicación para la selección de espacios públicos

La evaluación de los servicios ecosistémicos mediante los parámetros mencionados anteriormente permite generar un índice cualitativo. De esta manera, para cada servicio ecosistémico se define un índice normalizado de cero a uno y la estimación del potencial se realiza mediante un promedio simple al asignar el mismo peso a cada servicio.

Paso 3:

Por último, para la selección de la tipología de SUDS más adecuada y su localización en el espacio público se considera el tipo de espacio, las restricciones específicas del sitio, los requisitos espaciales de la tipología y su desempeño en la provisión de servicios ecosistémicos (ver la Figura 130). En primer lugar, de acuerdo con el espacio disponible y el potencial del espacio público para proveer servicios ecosistémicos, se eligen áreas específicas para la implementación de los SUDS.

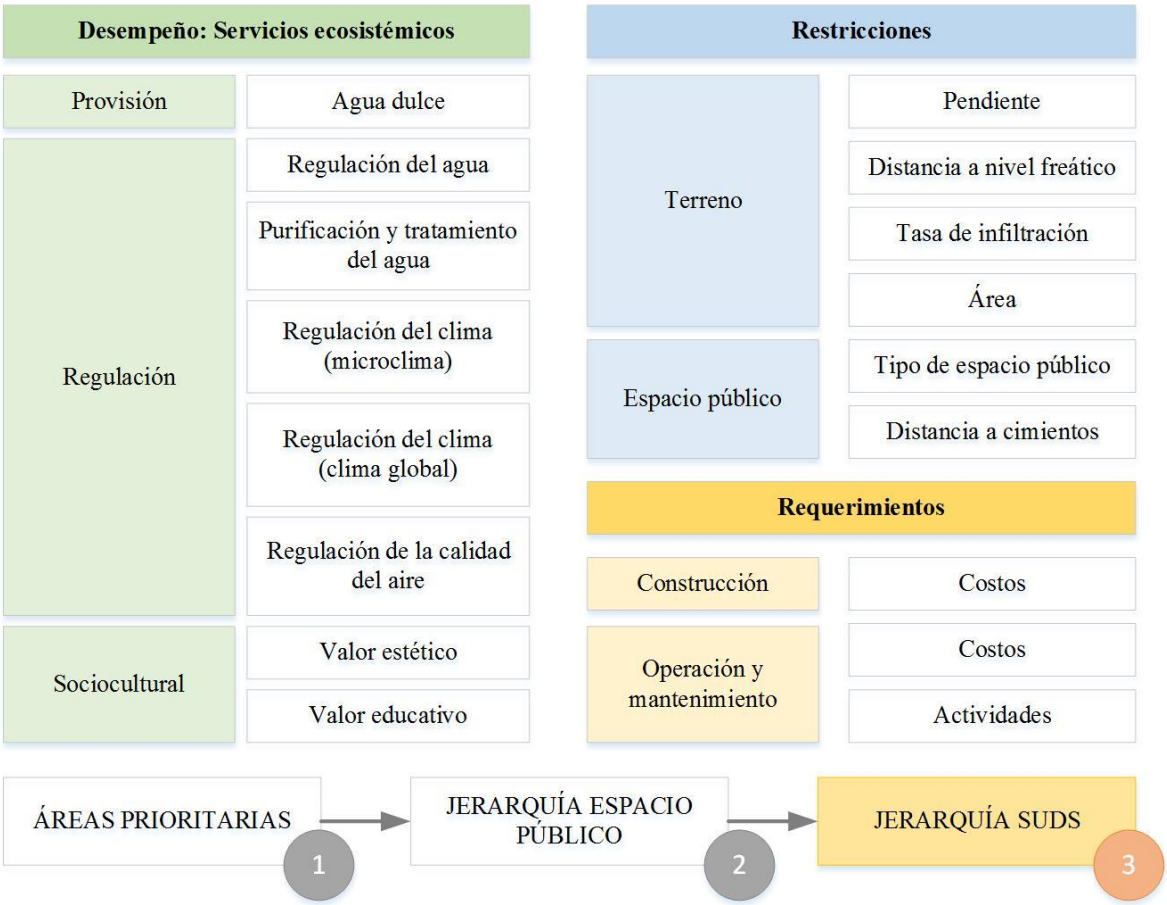


Figura 130. Selección de ubicación y tipología de SUDS

Para definir las tipologías factibles en un área específica se consideran las restricciones del sitio y los requisitos espaciales de cada estructura. Las restricciones del sitio incluyen la pendiente, la distancia al nivel freático, la tasa de infiltración y la distancia a los cimientos. Así mismo, los requisitos espaciales, que dependen de cada tipología, comprenden el área mínima para su implementación y la relación largo-ancho. La Tabla 180 presenta tanto las restricciones como los requisitos de cada tipología de SUDS considerada.

Tabla 180. Restricciones para la implementación de SUDS

Parámetro	**Restricción**	**Cunetas verdes**	**Zanjas de infiltración**	**Pavimentos permeables**	**Pondajes húmedos**	**Zonas de bioretención**	**Alcorques inundables**	**Humedales construidos**	**Cuenca de infiltración**	**CSDE**
Pendiente (%)	Máximo	10[1]	5[1]	5[1]	15[1]	10[1]	10[1]	15[1]	3[2]	15[1]
	Mínimo	1[3]	1[4]	0.5[5]	-	-	-	1[6]	0[3]	1[4]
Distancia al nivel freático(m)	Mínimo	1.5[1]	3[4]	3[7]	1.3[8]	1.8[5]	1[5]	1.3[8]	1.2[8]	3[1]
Tasa de infiltración (mm/h)	Mínimo	13[5]	7[8]	13[5]	-	7[9]	7[9]	-	13[8]	7[4]
Distancia a cimientos (m)	Mínimo	4[10]	6[11]	6[11]	6[11]	6[11]	2	6[11]	6[11]	6[4]
Area (m^2)	Mínimo	15	15	1	150[12]	1	2.25	1000[8]	45	45
Razón Largo - Ancho	Mínimo	-	-	-	2[12]	-	-	3[2]	2[13]	2[13]

Parámetro	Restricción	Cunetas verdes	Zanjas de infiltración	Pavimentos permeables	Pondajes húmedos	Zonas de bioretención	Alcorques inundables	Humedales construidos	Cuenca de infiltración	CSDE
Ancho(m)	Mínimo	0.5	0.5	1	8	0.6	1.5	18	5	5
Largo (m)	Mínimo	30	30	1	20[13]	1.2	1.5	56	9	9
Espacio público[14]	Parques	X	X		X	X	X	X	X	X
	Plazas					X	X			
	Separadores	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Andenes			X		X	X			
	Franja control	X	X		X	X	X	X	X	X
	Ronda	X	X		X	X	X	X	X	X
	Vía			X						
	Cicloruta			X						

[1] [228], [2] [229], [3] [230], [4] [231], [5] [232], [6] [233], [7] [234] , [8] [235], [9] [236], [10] [237], [11] [238], [12] [239], [13] [240], [14] [241]

La selección la tipología de SUDS más adecuada para un sitio se realiza considerando su desempeño relacionado con múltiples aspectos (i.e. provisión de servicios ecosistémicos, costos y requerimientos de mantenimiento). Se define una matriz que posee una calificación para los aspectos anteriormente mencionados con el fin de comparar las tipologías entre sí (ver la Tabla 181). Estos valores se establecen según lo reportado por Jiménez Ariza et al. [225] y Bernal et al. [242] en sus investigaciones.

Tabla 181. Desempeño de los SUDS

Tipologías	Provisión agua dulce	Regulación del agua	Purificación del agua	Regulación del Microclima	Regulación del clima global	Regulación de la calidad aire	Valor estético	Valor educativo	Mantenimiento	Costo
Cuentas verdes	1	1	2	3	2	2	2	3	4[1]	4[1]
Zonas de bioretención	3	2	4	4	3	4	4	3	2.67[1]	2.67[1]
Alcorques inundables	2	1	3	4	3	4	3	2	2.67[1]	2.67[1]
Cuenca seca de drenaje extendido	3	2	3	3	2	2	4	3	2.67[1]	2.67[1]
Zanjas de infiltración	1	4	4	2	1	2	1	1	1.33[1]	2.67[1]
Pavimentos permeables	1	3	3	3	0	1	1	2	2.67[1]	1.33[1]
Pondajes húmedos	4	3	3	3	4	2	4	4	2.67[1]	2[1]
Humedales construidos	4	3	4	4	4	4	4	4	1.33[1]	2[1]
Cuencas de infiltración	2	4	3	3	2	2	4	3	1.33[1]	2[1]

[1] [243]

Para la selección final de las tipologías de SUDS se utiliza el modelo de optimización desarrollado por Torres et al. [18]. Este selecciona y localiza las tipologías a partir del acople de un sistema de información geográfica (GIS) con un modelo lineal mixto estocástico de dos etapas (TS-MILP). El modelo incorpora tres funciones objetivo: (1) la minimización del volumen de escorrentía descargado, (2) la maximización de los beneficios relacionados con la provisión de servicios ecosistémicos y (3) la minimización de los

costos de construcción y mantenimiento de las tipologías. Cuanto se optimiza la siguiente función objetivo, se permite un detrimento de máximo el 10% de los resultados obtenidos para la función anterior.

La información requerida por el modelo incluye el listado de tipologías aptas por polígono de espacio público, el área de drenaje, el coeficiente de escorrentía y el área de cada polígono que se puede ocupar con SUDS. Adicionalmente, se requiere información de precipitación horaria del área y evaporación y costos de cada tipología de SUDS. La Tabla 182 presenta los costos adoptados para cada estructura. Como resultado de la aplicación de este modelo se obtiene un archivo *csv*, el cual contiene las características y coordenadas de la selección óptima de las tipologías de SUDS.

Tabla 182. Costos de construcción y mantenimiento de los SUDS

Tipología	Costos de construcción (COP/m$^{2)}$	Costos de mantenimiento (COP/m^2/año)
Cunetas verdes	$ 64,081.16[1]	$ 4,069.15[2]
Zonas de bioretención	$ 118,496.64[1]	$ 9,657.48[2]
Alcorques inundables	$ 738,047.05[1]	$ 72,181.00[2]
Cuenca seca de drenaje extendido	$ 65,218.66[1]	$ 4,826.18[2]
Zanjas de infiltración	$ 362,064.83[1]	$ 51,051.14[2]
Pavimentos permeables	$ 351,203.73[1]	$ 19,777.12[2]
Pondajes húmedos	$ 321,079.92	$ 24,241.53[2]
Humedales construidos	$ 321,079.92[1]	$ 24,241.53[2]
Cuencas de infiltración	$ 122,272.21	$ 10,209.73[2]

[1] [244], [2] [245]

- **Servicios ecosistémicos provistos por los SUDS**

Para Ciudad Verde se llevó a cabo la valoración de tres servicios ecosistémicos provistos por las tipologías SUDS seleccionadas en el escenario C (1 cuenca seca de drenaje extendido - CSDE, 9 cunetas verdes - CV y 11 pondajes húmedos - PH). De los servicios provistos por los SUDS, fueron seleccionados los de provisión y regulación (calidad) del agua y regulación de clima local (las islas de calor urbanas), debido a la disponibilidad de información para el caso de estudio. Los dos primeros servicios se analizaron mediante valoración económica y sus resultados se utilizaron como insumo en la estimación de la costo-efectividad del escenario C.

La valoración económica del servicio de regulación del clima local suele incluir análisis asociados con la energía ahorrada por regulación térmica [109], [110], [111]. Sin embrago, para el contexto del caso de estudio no es relevante dicho análisis, por lo cual se optó solo por cuantificar el servicio. Si bien no es posible representar los resultados de este servicio en términos económicos, su cuantificación permite evidenciar beneficios adicionales obtenidos por la implementación de los SUDS. En la Tabla 183 se resumen las medidas de cuantificación y metodologías económicas utilizadas para valorar los servicios mencionados.

Tabla 183. Medidas de cuantificación y valoración económica de los servicios ecosistémicos

Servicio	Medida de cuantificación	Metodología económica	Valor económico asignado
Provisión de agua	Agua obtenida de los pondajes húmedos	Costos de mercado	Valor comercial del agua (uso para riego)
Regulación del agua (calidad)	Agua no vertida al sistema de drenaje (agua percolada y evaporada de las tipologías)	Costos evitados	Tasa Retributiva por vertimientos puntuales
Regulación del clima local (islas de calor)	Cambio promedio de la temperatura ambiental	-	-

Para la cuantificación de los servicios se llevaron a cabo balances hidrológicos en las tipologías y en las zonas verdes asociadas pues de los procesos involucrados en los balances se obtuvieron algunas medidas de cuantificación. En términos generales, todos los balances hidrológicos parten de la Ecuación 21, la cual puede llegar a ser tan detallada como se requiera. Para este caso, se plantearon balances para el componente superficie (Ecuación 22) y el componente suelo (Ecuación 23) de la estructura o zona verde que se estuviera analizando. Cada componente considera procesos diferentes que, dependiendo de la tipología o zona verde, podrían estar o no presentes.

$$\Delta S = V_{entradas} - V_{salidas} \quad 21$$

$$\Delta S_{superficie} = V_P + V_{Esc} - V_{InfR} - V_{otras\ salida} \quad 22$$

$$\Delta S_{suelo} = V_{InfR} - V_{ETR} \quad 23$$

Donde: $\Delta S_{superficie}\ (m^3)$ = Cambio de almacenamiento en superficie, $V_P(m^3)$ = Volumen de precipitación que cae sobre la tipología o zona, $V_{Esc}\ (m^3)$ = Volumen de escorrentía, $V_{InfR}\ (m^3) =$ Volumen de infiltración real, $V_{salida}(m^3)$ = Volumen de agua que sobrepasa la capacidad del componente, $V_{otras\ salidas}\ (m^3)$ = Volumen de agua asociado con otros flujos de salida, $\Delta S_{suelo}\ (m^3) =$ Cambio de almacenamiento en el suelo, $V_{ETR}\ (m^3)$ = Volumen de evapotranspiración real y $V_{Perc}\ (m^3)$ = Volumen percolado.

Todos los balances se realizaron para un periodo de 1 año a partir de información horaria. La información de precipitación fue obtenida de la estación Kennedy de la RMCAB para el año 2013 [246] y la información de evapotranspiración potencial se estimó con información de evaporación de la estación Huertas de la EAB -ESP para el año 2013, un factor de tanque de 0.8 y factores de vegetación asociados a cada tipología y zona verde. La infiltración potencial para cada tipología y zona se estimó a partir de exploraciones geotécnicas disponibles en el Sistema de Información Geotécnica (SISGEO) de la EAB [247]. Para determinar los volúmenes de agua que entran por precipitación (V_P) fue necesario conocer las áreas de las tipologías y zonas verdes. Por su parte, los volúmenes de entrada por escorrentía (V_{Esc}) se calcularon con las áreas de drenaje asociadas a las tipologías y los coeficientes de escorrentía característicos.

Como supuesto para todos los balances, se estableció que no habría evapotranspiración en los intervalos de tiempo que lloviera. Adicionalmente, el agua podría infiltrarse y evapotranspirarse a su tasa potencial siempre y cuando hubiese agua suficiente para ello, de lo contrario se utiliza el agua disponible en la superficie y el suelo. Los flujos de salida en superficie (V_{salida}) y suelo (V_{Perc}) están restringidos principalmente por la capacidad de almacenamiento de ambos componentes. La capacidad de almacenamiento en superficie para las tipologías se estimó con su área y profundidad de diseño mientras que, para el suelo, se utilizó su capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente característico. Según las exploraciones geotécnicas realizadas por la EAB se determinó que el tipo de suelo predominante en Ciudad Verde es limo-arcilloso [247].

El agua es retenida en el suelo por adsorción de la arcilla o de la materia orgánica (humedad adherida) y entre los poros de las partículas sólidas (humedad libre). La humedad adherida no puede ser utilizada por las plantas porque se necesita una energía de succión muy alta para extraerla. Por lo tanto, la humedad disponible es igual a la diferencia entre el contenido de la humedad a Capacidad de Campo (humedad libre) y el contenido de la humedad a Punto de Marchitamiento Permanente (humedad adherida) [248]. De acuerdo con el *Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia* de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) la lámina de humedad disponible puede calcularse con la Ecuación 24. En la Tabla 184 se resumen las constantes requeridas para un tipo de suelo limo – arcilloso. El nivel freático para cada tipología y zona se obtuvo de las exploraciones geotécnicas realizadas por la EAB.

$$L = (CC - PMP)\, D_a\, P \qquad 24$$

(1mm de lámina de agua = 1Kg/m^2 = 1 litro/m^2 = 10 m^3/ha)

Donde: $L\,(mm)$ = lámina de agua aprovechable almacenada, $CC(\%)$ = contenido de humedad a capacidad de campo, $PMP(\%)$ = contenido de humedad a punto de marchitamiento permanente, $D_a(g/cm^3)$ = densidad aparente del suelo y $P(mm)$ = profundidad del suelo (para el caso de estudio se asumió la profundidad al nivel freático)

Tabla 184. Constantes para un tipo de suelo limo-arcilloso [248]

Parámetros para suelos limo-arcillosos		**Valor**
Densidad aparente del suelo (g/cm^3)	D_a	1.35
Contenido de humedad a capacidad de campo (%)	CC	27
Contenido de humedad a punto de marchitamiento permanente (%)	PMP	13

a) Servicio de provisión de agua

Uno de los principales objetivos de estructuras como las cuencas secas de drena extendido y las cunetas verdes es detener temporalmente la escorrentía para permitir su descarga de forma controlada, mientras que los pondajes húmedos están diseñados para retener importantes volúmenes de agua por ventanas de tiempo más prolongadas [112]. Por lo tanto, es posible contar con reservas de agua aprovechables en los pondajes de forma más permanente, que en las otras dos estructuras. Debido a lo anterior, se decidió valorar el servicio de provisión de agua solo para los pondajes ya que sería necesario implementar estructuras de almacenamiento anexas para aprovechar el agua obtenida de las cunetas y la cuenca seca.
La medida de cuantificación definida para valorar este servicio corresponde al flujo de salida anual de los pondajes para suplir las necesidades de riego de las zonas verdes que se encuentran dentro de un radio de 500 m (5 minutos de caminata). Esta distancia fue seleccionada porque puede ser cubierta a pie diariamente sin mayores inconvenientes, según literatura [249], y por lo tanto podría ser un buen estimativo de una distancia aceptada para actividades de riego.

Por medio de balances hidrológicos se determinó el flujo de agua requerido para que las zonas verdes evapotranspiren a su tasa potencial (déficit de agua). Para ello se plantearon los balances presentados en la Ecuación 25 y 26. Para las zonas verdes se asume que no hay almacenamiento en superficie, toda el agua que no se infiltra representa un flujo de salida (V_{salida}). El déficit de agua se determina como la diferencia entre la evapotranspiración potencial y real. Será requerida agua para riego en un determinado periodo de tiempo si este valor es negativo. En este caso las plantas evapotranspirarán el agua disponible por infiltración y la almacenada en el suelo.

$$\Delta S_{superficie\ zonas\ verdes} = V_P - V_{InfR} - V_{salida} \qquad 25$$

$$\Delta S_{suelo\ zonas\ verdes} = V_{InfR} - V_{ETR} - V_{Perc} \qquad 26$$

Los pondajes húmedos están diseñados para retener el agua lluvia, por lo tanto, no permiten la infiltración. Adicionalmente, deben mantener un volumen permanente de agua del cual se podrá extraer hasta un 30% para actividades de irrigación de ser necesario. En este sentido, los balances hidrológicos están planteados para dos componentes: superficie temporal y permanente, los cuales se representan con la Ecuación 27 y 28. Si hay suficiente agua en el componente superficie-temporal en un determinado intervalo de tiempo para suplir las necesidades de riego de las zonas verdes ($V_{otras\ salidas\ 2}$), no es necesario complementar este flujo con agua del componente superficie-permanente $(V_{otras\ salidas\ p})$.

$$\Delta S_{superficie-temporal} = V_P + V_{Esc} - V_{otras\ salidas\ 1} - V_{ETR} - V_{otras\ salidas\ t} - V_{salida} \quad 27$$

$$\Delta S_{superficie-permanente} = V_{otras\ salidas\ 1} - V_{ETR} - V_{otras\ salidas\ p} \quad 28$$

Donde: $V_{otras\ salidas\ 1}(m^3)$ = volumen de agua dirigido al volumen permanente, $V_{otras\ salidas\ t}(m^3)$ = volumen para actividades de riego obtenido del componente superficie-temporal, $V_{otras\ salidas\ p}(m^3)$ = volumen para actividades de riego obtenido del componente superficie-permanente.

De esta manera, se llevaron a cabo los balances hidrológicos anuales para cuantificar el servicio de provisión mediante los flujos de agua suministrados por los pondaje para suplir los requerimientos de riego de las zonas verdes, sin afectar el volumen permanente característico de estas estructuras. Además, de los balances en los pondajes fue posible determinar flujos de evapotranspiración y salida, los cuales fueron de utilidad en la valoración del servicio de regulación y en el análisis del abatimiento de las tipologías, respectivamente.

b) Servicio ecosistémico de regulación del agua

El servicio de regulación del agua implica el manejo de la escorrentía por medio de procesos de percolación, almacenamiento en vegetación y suelo y evapotranspiración [250]. Las tipologías SUDS, como las cuencas secas de drenaje extendido y las cunetas verdes, están diseñadas para fomentar dichos procesos y de esta manera reducir los volúmenes de escorrentía y mejorar su calidad. Los pondajes húmedos están diseñados para retener la escorrentía y amortiguar crecientes. De esta manera se favorece la remoción de sólidos suspendidos, metales, materia orgánica y nutrientes por medio de procesos biológicos y de sedimentación, por lo tanto, no deben permitir la percolación. Sin embargo, la evapotranspiración es un proceso de regulación importante en estas estructuras [112].

La medida de cuantificación utilizada para valorar este servicio corresponde al agua total regulada por los SUDS mediante evapotranspiración y percolación. En el caso de los pondajes húmedos sólo se tuvo en cuenta la evapotranspiración. Estos flujos también fueron determinados por medio de balances hidrológicos y la información requerida fue la misma utilizada en la valoración del servicio de provisión. En la Ecuación 29 y 30 se representan los balances realizados para la cuenca seca y las cunetas verdes. A diferencia de los balances para las zonas verdes, estas estructuras si pueden almacenar agua, por lo tanto, el flujo de salida (V_{salida}) depende de la capacidad de cada tipología.

$$\Delta S_{superficie} = V_P + V_{Esc} - V_{InfR} \quad 29$$

$$\Delta S_{suelo} = V_{InfR} - V_{ETR} \quad 30$$

c) Servicio ecosistémico de regulación del clima local (islas de calor)

La temperatura local puede ser amortiguada por las zonas verdes y los cuerpos de agua presentes en los centros urbanos. Estos últimos son capaces de regular la temperatura por medio de la absorción del calor en las temporadas cálidas y su liberación en las temporadas invernales. Así mismo, la vegetación puede reducir la temperatura en los meses más calurosos a través de la sombra y la absorción del calor mediante la evapotranspiración [250]. La intensidad de las islas de calor se define como la diferencia entre la temperatura de las zonas rurales (poco urbanizadas) y las urbanas. Comúnmente el efecto de las zonas verdes y los cuerpos de agua se analiza a través de mediciones de la temperatura de ciertos puntos en los centros urbanos y la distribución de estas coberturas dentro de un radio de influencia asociado a cada medición. Por lo general, aquellas áreas con mayor presencia de zonas verdes y cuerpos de agua presentan menores temperaturas ambientales con respecto a las áreas con mayor cantidad de áreas impermeables [251], [252],[253].

Dado que todas las tipologías SUDS propuestas para el escenario C van a ser implementadas en zonas verdes, analizar el efecto de su implementación con el anterior enfoque no permitiría apreciar sus beneficios. Sin embargo, a diferencia de la infraestructura verde tradicional, los SUDS reciben mayor cantidad de agua por la escorrentía direccionada para ser manejada, así que, en principio, tendrían más agua disponible para ser evapotranspirada y su capacidad de reducir la temperatura se incrementaría [254]. Teniendo en cuenta lo anterior, la valoración del servicio de regulación del clima local se llevó a cabo mediante la cuantificación del cambio en la tasa de enfriamiento propiciado por el incremento en la evapotranspiración debido a la implementación de SUDS en las zonas verdes.

La metodología propuesta determina la diferencia de la evapotranspiración en las zonas verdes con y sin la implementación de SUDS y posteriormente estima el cambio en la tasa de enfriamiento correspondiente. La evapotranspiración en las zonas verdes se estimó con balances hidrológicos en los que se tuvo en cuenta el área de las dichas zonas y el agua lluvia que cae sobre ellas. A diferencia de los balances realizados para las tipologías, no se consideró el ingreso de agua adicional por escorrentía. La Ecuación 25 y 26 son aplicables en este caso para representar los balances de las zonas verdes sin la implementación de SUDS.

Para determinar el cambio en la tasa de enfriamiento esperado por la implementación de SUDS, se llevó a cabo un balance energético que asocia el calor sensible cedido por el ambiente con el calor latente necesario para evapotranspirar el agua presente en cada zona. El calor sensible del ambiente está descrito por la Ecuación 31 y el calor requerido para la evapotranspiración por unidad de área, por la Ecuación 32.

$$Q_a = m_a C_a \Delta T \quad (31)$$

$$\dot{Q_w} = \dot{m_w} L_v \quad (32)$$

Donde: $m_a\ (Kg)$ = masa de aire a una altura h sobre la superficie, $C_a\ (J/Kg\ /K)$ = Calor específico del aire, $\Delta T\ (°C/s)$ = tasa de enfriamiento evidenciado en la masa de aire, $\dot{m_w}\ (Kg/s)$= flujo de agua consumida por las plantas, $L_v\ (J/Kg)$ = calor latente volumétrico de vaporización.

El calor latente volumétrico de vaporización (L_v), la masa de aire a una altura h sobre la superficie (m_a) y el flujo de agua consumida por las plantas $(\dot{m_w})$ se puede determinar de la siguiente manera:

$$L_v = 2501020 - 2.369T_{(°C)} \quad (33)$$

$$\dot{m_w} = ETP\rho_w A \quad (34)$$

$$m_a = h\rho_a A \quad (35)$$

Donde: $T_{(°C)}$ = temperatura ambiental en grados Celsius, $ETP(m/s)$ = evapotranspiración real de la zona verde o el SUDS, $\rho_w\ (Kg/m^3)$= densidad del agua, $h\ (m)$ = altura sobre la superficie, $\rho_a(Kg/m^3)$ = densidad del aire húmedo, $A\ (m^2)$ = área superficial de la zona. Para el presente caso, se estimó el cambio de temperatura a 2 m sobre la superficie, pues la temperatura ambiental es usualmente reportada a esta altura por las estaciones de la RMCAB y el IDEAM.

La densidad del aire húmedo (ρ_a) se pude calcular de la siguiente manera:

$$\rho_a = \frac{P_a - e}{R_d T_{(K)}} + \frac{0.622e}{R_d T_{(K)}} \quad (36)$$

Donde: $P_a\ (Pa)$ = presión ambiental, $e(Pa)$ = presión de vapor, $R_d(J/Kg\ /K)$ = constante del aire seco, $T_{(K)}$ = temperatura ambiental en Kelvin.

Por su parte, la presión de vapor (e) puede calcularse de la siguiente manera:

$$e = R_H e_s \quad (37)$$

$$e_s = 610.8_{(Pa)}\, exp\left(\frac{17.27T_{(°c)}}{237.3 + T_{(°c)}}\right) \quad (38)$$

Donde: $e_s\ (Pa)$ = presión de vapor de saturación, $R_H(\%)$ = humedad relativa.

La Ecuación 39, describe la tasa de enfriamiento esperado debido a la evapotranspiración $\Delta T(°C/s)$ por unidad de volumen de aire $V_a(m^3)$ [254] [255] [256]. En la Tabla 185 se presentan los valores de las contantes requeridas para el análisis. La presión ambiental y la humedad relativa promedio se calcularon a partir de información diaria disponible para la estación Kenney de la RMCAB [246] para los años del 2006 al 2019.

$$\Delta T = \frac{\dot{Q_w}}{V_a\ \rho_a\ C_a} \quad (39)$$

Tabla 185. Constantes utilizadas para estimar el cambio de temperatura asociada al incremento en la evapotranspiración

Constante		**Unidades**	**Valor**
Calor específico del aire seco	C_a	J/Kg/°C	1 012
Altura sobre la superficie	h	m	2
Humedad relativa promedio	R_H	%	65.55
Presión ambiental promedio	P_a	Pa	75 171.01
Constante del aire seco	R_d	J/Kg/K	287
Densidad del agua	ρ_w	Kg/m^3	1 000
Radiación solar	R_n	W/m^2	162.39

Para calcular el calor latente volumétrico de vaporización (L_v) y la presión de vapor de saturación (e_s) es necesario, en lo posible, contar con la temperatura ambiental de cada zona. Sin embargo, cerca de Ciudad Verde hay pocas estaciones meteorológicas con las que se pueda determinar la temperatura ambiental con la resolución espacial requerida. Por lo tanto, se utilizó información satelital para estimar la temperatura superficial y junto con información de temperatura ambiental medida por estaciones meteorológicas, se determinó la temperatura ambiental con la resolución necesaria para el análisis mediante regresiones lineales.

La temperatura superficial para Bogotá y ciudad verde se estimó a partir del procesamiento de imágenes satelitales Landsat 8 disponibles en la página Earth Explorer, perteneciente al Servicio Geológico de los Estados Unidos. Fueron utilizadas imágenes satelitales del 22 de marzo del 2020, 2 de enero del 2020, 30 de diciembre del 2018 y 17 de marzo del 2018 [113], ya que de la información más reciente disponible, estas no presentaban nubosidad que afectara los resultados. Información de temperatura ambiental promedio para las mismas fechas se obtuvo de estaciones del IDEAM y la RMCAB, las cuales se especifican en la Tabla 186. Dicha información fue interpolada para obtener archivos ráster de temperatura ambiental para la ciudad de Bogotá incluyendo Ciudad Verde.

Tabla 186. Estaciones utilizadas para obtener la temperatura ambiental para varias fechas

Estación	**Fecha**				**Fuente**	
	22/03/2020	**02/01/2020**	**30/12/2018**	**17/03/2018**	**IDEAM**	**RMCAB**
Carvajal - Sevillana	×	×	×	×		×
Centro de Alto Rend.	×	×	×	×		×
Fontibón	×	×	×			×
Kennedy	×	×	×	×		×
Las Ferias	×	×	×	×		×
Puente Aranda	×	×	×	×		×
San Cristóbal	×	×	×	×		×
Suba	×	×	×	×		×
Tunal	×	×	×			×

Estación	Fecha				Fuente	
	22/03/2020	02/01/2020	30/12/2018	17/03/2018	IDEAM	RMCAB
Usaquén	×	×	×			×
Aeropuerto Catam			×		×	
Univ. Agrop. UDCA				×	×	
Col Miguel A. Caro				×	×	
Llano Largo			×	×	×	
San Jorge Granja	×	×	×	×	×	
Tibaitatá	×	×	×		×	

Varios estudios han correlacionado la temperatura ambiental con la temperatura superficial obtenida de imágenes satelitales y otros parámetros (elevación, radiación solar, velocidad del viento, porcentaje de áreas impermeables, longitud, latitud entre otros) para obtener relaciones que permitan estimar temperatura ambiental con mayor detalle espacial [257], [258], [259]. Para el caso de estudio, sólo se tuvo en cuenta la temperatura superficial como variable explicativa de la temperatura ambiental debido a limitaciones en la información disponible para otros parámetros.

La información de temperatura superficial y ambiental se obtuvo en formatos ráster con la misma resolución, para facilitar el proceso de correlación entre celdas. Además, dicho proceso se llevó a cabo para cada fecha y para el promedio de las mismas. La correlación con el mejor ajuste se utilizó para calcular la temperatura ambiental en las zonas verdes.

Como se mencionó anteriormente, la energía necesaria para evapotranspirar el agua es obtenida de las masas de aire circundantes. Por lo tanto, se estimó la razón entre la energía requerida para la evapotranspiración ($\dot{Q_w}$) y la radiación neta promedio (R_n) que incide sobre el sistema (ver Ecuación 40) para contar con una medida indirecta del efecto de enfriamiento de la vegetación [114]. Lo anterior se llevó a cabo con el fin de comparar el consumo de energía ambiental en Ciudad Verde antes y después de la implementación de los SUDS, pues la tasa de enfriamiento no permite dicho análisis ya que sería necesario contar con información de temperatura ambiental con menor resolución temporal. A partir de la Ecuación 41 se determinó el incremento del consumo de energía por la implementación de los SUDS propuestos, lo cual está directamente relacionado con la disminución de la temperatura. La radiación incidente se obtuvo de la estación Kenney de la RMCAB [148] para los años del 2006 al 2019 y su valor se presenta en la Tabla 185.

$$r = \frac{\dot{Q_w}}{R_n} \quad (40)$$

$$i = \frac{r_{con\ SUDS} - r_{sin\ SUDS}}{r_{sin\ SUDS}} \quad (41)$$

- ***Valor económico de los servicios***

En términos generales, el valor económico asociado con la provisión de los servicios de provisión y regulación del agua puede calcularse con la Ecuación 42. La medida de cuantificación y el valor económico unitario deben ser consistentes y dependen en gran medida de la información disponible y los requerimientos de las partes interesadas [111].

$$V = MC \times VU \quad (42)$$

Donde: $V\ (\$/año)$ = valor económico total asociado por la provisión del servicio, $MC(medida\ cuantificacion/año)$ = medida de cuantificación anual del servicio considerado, $VU\ (\$/\ medida\ cuantificacion) =$ valor económico por unidad de servicio provisto.

a) Servicio de provisión de agua

El valor económico asociado al servicio de provisión del agua se determinó a partir de la metodología Costos de mercado, la cual hace referencia al dinero que se paga por los bienes y servicios provistos por los ecosistemas que se comercian en mercados reales [115]. En este caso fue utilizado el valor comercial del agua, representado por el valor promedio de la tarifa del consumo básico establecida por la EAB para el año 2018 ($ 2 115/m^3) [116]. Una vez cuantificados los flujos para irrigación y el valor económico unitario fue utilizada la Ecuación 43 para estimar el valor económico total anual.

$$V_{PA} = MC_{FI} \times VU_{EAB} \quad 43$$

Donde: V_{PA} $(\$/año)$ = valor económico total asociado a la provisión de agua, $MC_{FI}(m^3/año)$ = flujo anual para irrigación, VU_{EAB} $(\$/m^3)$ = tarifa establecida por la EAB.

b) Servicio ecosistémico de regulación del agua

El valor económico asociado al servicio de regulación del agua se determinó a partir de la metodología de Costos evitados, la cual hace referencia a los costos de medidas adoptadas para evitar los daños que se producirían si no existiera un servicio ecosistémico [115]. En este caso fue utilizada la Tasa Retributiva por Vertimientos Puntuales para el año 2018. Esta tasa es un instrumento económico que cobra la autoridad ambiental competente a los usuarios por la utilización del recurso hídrico como receptor de vertimientos puntuales directos o indirectos y se cobra por la totalidad de la carga contaminante descargada al recurso hídrico. Los valores por descarga de DBO y SST utilizados fueron respectivamente $144.39/Kg y $61.75/Kg [117].

En la actualidad, la escorrentía producida en Ciudad Verde es recolectada y conducida al pondaje al noroccidente de la zona. De esta manera, el agua regulada por evapotranspiración y percolación deja de ser vertida al sistema de drenaje y, por consiguiente, la carga contaminante presente. Dicha carga fue calculada a partir de los flujos de agua regulados y concentraciones típicas de DBO y SST reportadas en la literatura para escorrentía urbana con usos de suelo similares a los de Ciudad Verde (principalmente residencial). Las concentraciones utilizadas fueron 0.009 Kg DBO/m^3 y 0.0048 Kg SST/m^3 [260].
Para que la medida de cuantificación de este servicio y los valores económicos unitarios fueran consistentes, se calculó el flujo de masa de los contaminantes asociados a la escorrentía regulada, mediante la Ecuación 44.

$$V_{RA} = MC_{FR} \times C_{DBO} \times VU_{DBO} \quad 44$$

Donde: V_{RA} $(\$/año)$ = valor económico total asociado a la regulación del agua, $MC_{FR}(m^3/año)$ = flujo anual regulado por percolación y evapotranspiración, $C_{DBO}(Kg/m^3)$ = concentración típica de DBO en escorrentía urbana, $C_{SST}(Kg/m^3)$ = concentración típica de SST en escorrentía urbana, VU_{DBO} $(\$/m^3)$ = tasa retributiva por vertimientos de DBO, VU_{SST} $(\$/m^3)$ = tasa retributiva por vertimientos de SST.

Anexo 11. Supuestos de modelación medidas de mejora Sector Gestión de Residuos

Se utilizó el software WRATE® para calcular la diferencia de emisiones entre la línea base de referencia y los escenarios de implementación de medidas de mejora para todas las instalaciones de gestión de residuos, exceptuando el relleno sanitario. Las emisiones en éste dentro de los escenarios con la implementación de medidas se calcularon siguiendo los lineamientos para inventarios del IPCC [80],

como se realizó en para la línea base. Para la modelación de mitigación año a año de las medidas de reemplazo de flota de camiones recolectores de residuos domiciliarios por vehículos con menores emisiones se utilizan los siguientes parámetros:

Tabla 187. Parámetros empleados para modelación de medidas de reemplazo de camiones recolectores por vehículos de bajas emisiones

	Camión diésel	**Camión biogás**	**Camión eléctrico**
Vida útil vehículo [años]	12	12	12
Eficiencia	42.00 [l/100 km]	45.05 [m3/100 km]	926.00 [Wh/km]
Factor emisión CO2-eq	2,759.4 [g/ l]	0.0	0.128 [g/Wh]

Respecto a la modelación de las emisiones de las demás medidas de mejora en WRATE®, se calcularon los resultados para la línea base y para las medidas de mejora en el software, de modo que se encontrara el abatimiento de emisiones año por efecto de la aplicación de la medida. El perfil de emisiones para cada medida se determinó comparando los deltas de emisión calculados a partir de los resultados del modelo en WRATE con la línea base de referencia correspondiente. Dada la diferencia en las categorías de caracterización de los residuos que se reporta para Soacha y la empleada en WRATE® para ingresar los datos para la modelación, se determinaron las aproximaciones a continuación:

- Se incluye dentro de la categoría *Plastic film* las cantidades correspondientes a PP y PEBD; y dentro de la categoría *Dense plastic* las cantidades de PET, PEAD, PVC, PS y otros plásticos.
- Para discriminar la cantidad de metales en ferrosos y no ferrosos, se utilizó la cantidad de cada material metálico que fue aprovechada y se asumió el mismo porcentaje para los residuos metálicos generados.
- El cuero, el caucho y otros residuos se clasifican en la categoría *Unspecified combustibles.*
- La cerámica se incluye en la categoría *Unspecified non-combustibles.*
- La planta de reciclaje de LLDPE y LDPE para películas agrícolas se extrapoló para reciclaje de LDPE y también para PP.
- La planta de reciclaje de vidrio transparente se usa para representar el reciclaje de todo tipo de vidrio.
- El aprovechamiento de los residuos de la categoría Otros se modelará a través de una planta de reciclaje de madera, teniendo en cuenta el contenido de muebles presente en esta categoría [24]. En este sentido, la cantidad de residuos dentro de la categoría Otros que son aprovechados se agregan a los residuos generados de la categoría Madera.
- Para la cuantificación de metales ferrosos y no ferrosos presentes en los residuos de barrido, se asumió la misma composición establecida para residuos domiciliarios (basada en la cantidad de metales ferrosos y no ferrosos aprovechados). De igual forma, la discriminación de plásticos entre densos y películas plásticas se realizó de acuerdo con los porcentajes de los plásticos presentes en los residuos domiciliarios.

Por otro lado, dada la limitación para ingresar la distribución de la matriz energética específica para Colombia en la versión que se tenía del software, se escogió para la modelación la matriz energética baja en carbono predeterminada constituida por 50% energía de hidroeléctricas, 40% nuclear, 5% gas, 3% eólica, 1% solar fotovoltaica y 1% a partir de residuos.

Para las medidas de aprovechamiento bioquímico y material propuestas, las fuentes de emisión de GEI modeladas, además de las consideradas para la línea base (transporte de residuos y descomposición en el relleno), se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 188. Fuentes de emisión consideradas para la modelación de las opciones de mejora de aprovechamiento bioquímico y material.

Sistema de tratamiento	Fuente de emisión
Compostaje	Descomposición de residuos
	Consumo de combustible operacional
	Consumo de energía eléctrica
Digestión anaerobia	Descomposición de residuos
	Consumo de combustible operacional
	Consumo de energía eléctrica
	Ahorros en emisión por producción de energía eléctrica
Estación de clasificación y aprovechamiento	Ahorros en emisión por uso de materiales reciclados*

*Si bien estos ahorros en emisión se atribuyen al sector industria (fuera del sistema de análisis de este proyecto), se calculan y muestran las emisiones evitadas por el uso de materiales reciclados en lugar de materias primas vírgenes.

- **Estimación de costos**

Para calcular el costo por tCO_2-eq reducida por la implementación de las medidas propuestas, se estimaron los costos para la línea base y para cada una de las medidas. La estimación de costo-eficiencia se realizó con una tasa de descuento de 9% y los valores se presentan en USD de 2019. En el caso de la línea base, los costos tenidos en cuenta en la evaluación fueron:

Tabla 189. Costos unitarios para actividades de gestión de residuos en el escenario de línea base

Actividad	Unidad	Valor	Fuente / Comentarios
Disposición final	USD/t	9.98	Costo por disposición final (CDF) reportada en los recibos de la empresa de aseo de Soacha [261].
Transporte al relleno	USD/t	25.42	Costo por la recolección y transporte (CRT) de los residuos al relleno sanitario reportada en los recibos de la empresa de aseo de Soacha [261].
Aprovechamiento	USD/t	34.09	Valor base de remuneración de aprovechamiento (VBA) reportado en los recibos de la empresa de aseo de Soacha [261]. Este valor es la remuneración vía tarifa a la recolección y transporte de los residuos aprovechables y la actividad de las bodegas y Estaciones de Clasificación y Aprovechamiento. No incluye los ingresos por la comercialización de los materiales clasificados y preparados en la estación.
Quema de biogás en el relleno	USD/t	0.41	Costo aproximado por la quema del biogás generado en relleno sanitario Nuevo Mondoñedo (25% desde 2019) por tonelada de residuo dispuesta. Este valor se aproximó a partir datos de la CRA sobre costos para tratamiento de biogás por tonelada de residuos dispuesta considerando que el relleno sanitario Nuevo Mondoñedo se encuentra en el rango de capacidad entre 500 y 3000 t/día (2975 COP de 2017/t residuo dispuesta) [123], y teniendo en cuenta que, en promedio, según datos de la UNFCCC, los rellenos sanitarios en este rango de capacidad con tratamiento de biogás en Colombia tienen una tasa de captura de cerca del 60%.
Campañas y capacitación	USD/ capacitado	4.98	Valor estimado a partir de presupuesto del PGIRS de Soacha destinado para la sensibilización y educación sobre la separación en la fuente a 80 recicladores, 20.000 unidades residenciales, encargados de 100 establecimientos comerciales y 17 encargados de grandes generadores de residuos [262]. El número de usuarios y recicladores a capacitar en Ciudad Verde en el escenario de línea base se calculó de manera ponderada con la población del municipio y de Ciudad Verde.
Contenerización	USD/ contenedor	260.75	Costo por contenedor de 1.100 L[263]. El número de contenedores en el escenario de línea base se calculó considerando la existencia de 390 contenedores en Ciudad Verde en 2018 [263], [264] y la cantidad de residuos generados en ese año, obteniendo un factor de contenedores/t residuo que se utilizó para los demás años del periodo de estudio. Se asumió una vida útil de 5 años para los contenedores.

- **Costos recolección diferenciada**

Como requisito para las medidas de compostaje descentralizado, digestión anaerobia y la instalación de una estación de clasificación para material reciclable dentro de Ciudad Verde, se requiere la implementación del esquema de recolección diferenciada. La recolección se dividirá en tres fracciones de residuos: residuos rápidamente putrescibles aprovechables dos veces por semana, junto con los no aprovechables y recolección de material reciclable una vez por semana. Para la recolección diferenciada se calculan los costos adicionales por instalar contenedores separados para cada una de las fracciones de residuos mencionadas, y por realizar capacitaciones sobre separación en la fuente para la totalidad de unidades de vivienda de Ciudad Verde en 2021, 2022 y 2023 (año de finalización de construcción de viviendas) y para la PRO que ejerce su actividad en el macroproyecto de vivienda (294 ponderando con la población de Soacha y Ciudad Verde). Para la estimación mencionada, se emplean los costos unitarios presentados en la Tabla 189.

- **Costos compostaje descentralizado**

Además de los costos adicionales asociados a la recolección diferenciada, se utilizó el costo unitario de 53.95 USD/t (basado en precios de [25] y [120]) para los residuos domiciliarios rápidamente putrescibles y de poda y corte césped tratados en la planta de compostaje. Si bien la planta de compostaje modelada como medida de mitigación es cerrada en silos verticales, su operación no requiere ventilación forzada, agitación ni calentamiento externo, por lo que sus costos de operación son más bajos que los de otros sistemas cerrados. Por esto se utiliza como precio de referencia una aproximación entre los costos de tratamiento en sistemas de pilas con volteo y los costos en sistemas de compostaje cerrado. Por otro lado, los costos de transporte desde la fuente de generación de residuos hasta la planta de compostaje se calculan como un ponderado del costo por recolección y transporte al relleno sanitario presentado en la Tabla 189 con las distancias hasta el relleno y hasta la planta de compostaje (esta distancia se asume como el recorrido interno de 28.7 km realizado en Ciudad Verde). Asimismo, dado que la implementación de compostaje disminuye la cantidad de residuos que se disponen en el relleno, se calculan costos por quema de biogás asociados con esta medida de acuerdo con el valor indicado en la Tabla 189.

- **Costos digestión anaerobia**

Adicional a los costos por recolección diferenciada, se utilizó el costo unitario de 57.39 USD/t [120] para los residuos domiciliarios rápidamente putrescibles tratados en la planta de digestión anaerobia. Este valor se estima para proyectos de digestión anaerobia en Reino Unido y no incluye la venta de la energía eléctrica generada a partir del metano ni los potenciales ingresos por comercialización de compost. Los costos por transporte de los residuos desde la fuente hasta la planta de digestión anaerobia y los costos por quema de biogás en el relleno se calculan como se describió en la medida de compostaje descentralizado.

- **Costos estación de clasificación y aprovechamiento**

Para la estimación de costos de esta medida se tuvo en cuenta los costos adicionales por recolección diferenciada y la inversión inicial de 1’123,917.3 USD por construir una instalación de capacidad similar a la propuesta [265]. El costo por tonelada aprovechada se mantuvo como en la Tabla 189, dado que el cambio en esta medida será que la estación de clasificación ahora está dentro de Ciudad Verde pero la

operación en la instalación es la misma que se realizaba fuera del macroproyecto antes de la implementación de la medida.

- **Costos quema de biogás**

Para esta medida, de manera similar a la línea base, se aproximó el costo de quema de biogás por tonelada dispuesta a partir datos de la CRA para rellenos sanitarios en el rango de capacidad entre 500 y 3000 t/día (2975 COP de 2017/t residuo dispuesta) [123]. Se tuvo en cuenta que, en promedio, según datos de la UNFCCC, los rellenos sanitarios en este rango de capacidad con tratamiento de biogás en Colombia tienen una tasa de captura de cerca del 60% para aproximar un valor de costo para sistemas con tasa de captura de 75%, como se propone en la medida.

Los costos de las demás actividades de gestión se mantienen como en la línea base.

- **Costos vehículos eléctricos e impulsados por biogás**

Para la estimación de los costos por el reemplazo de los vehículos recolectores de residuos por camiones eléctricos y por vehículos impulsados por biogás, la diferencia en los costos con la línea base se calculó sólo sobre la inversión inicial realizada para la compra de los vehículos y sobre los costos de operación y mantenimiento de los camiones. Se asumió que en el escenario de línea base los vehículos que recogen y transportan los residuos de Ciudad Verde también serían reemplazados en 2021 por vehículos recolectores nuevos a diésel.

Tabla 190. Valores utilizados para estimación de costos de reemplazo de camiones recolectores por vehículos eléctricos e impulsados por biogás

	Camión diésel	**Camión biogás**	**Camión eléctrico**
Costos mantenimiento [US$/año]	14,636.9	16,437.2 [186]	15,630 [186]
Precio vehículo [US$]	182,961	205,465 [186]	312,600 [186]
Costo combustible	1.09 [USD/l]	0.95[USD/m^3]*	0.00018 [USD/Wh]

*De acuerdo con [266], los costos del biogás como combustible varían dependiendo del tamaño de la capacidad de generación de energía, en este caso, mediante la digestión anaerobia de residuos municipales. Para la escala de generación de biogás a partir de los residuos de Ciudad Verde (cerca de 200 m3/h), el costo del combustible es de **0.72 – 1.18 USD / m^3 CH_4** incluyendo costos por la producción, purificación y distribución de biogás a través de la red existente de gas natural como se muestra en la imagen a continuación. Los costos mencionados están normalizados por m^3 de metano, que constituye alrededor del 98% del volumen total del biometano obtenido luego de la purificación y mejoramiento del biogás y tiene un poder calorífico de 11.06 kWh/m^3 [266], muy similar al poder calorífico del gas natural genérico usado como combustible en Colombia (10.97 kWh/m^3) [78]. Estos valores no incluyen los costos de operación del sistema público de distribución de gas y las estaciones de recarga y fueron calculados a partir de casos en Europa Central, sin embargo, serán utilizados como referencia para la estimación de costos en el caso de Ciudad Verde debido a la escasez de información sobre proyectos en el contexto local.

- **Análisis de Ciclo de Vida**

En este análisis se incluyen las emisiones[13] asociadas a la operación de las instalaciones de gestión de residuos y las generadas, además, por su construcción, mantenimiento y futuro desmantelamiento, contemplando así todas las etapas de su ciclo de vida.

Para calcular el perfil de emisiones con enfoque de análisis de ciclo de vida en los escenarios de línea base y de implementación de medidas de mejora, se realizaron los siguientes supuestos para analizar la información generada por el modelo WRATE:

- Dado que la modelación en el software se realiza para cada año por separado y no para un periodo de estudio generando un perfil de emisiones, las emisiones por construcción, mantenimiento y desmantelamiento se calcularon dependiendo de la cantidad de residuos gestionados que ingresan a la instalación en el año analizado. Por esta razón, se establecieron los criterios mostrados a continuación dependiendo del tipo de instalación analizada.
    - Para los rellenos sanitarios, dado que los residuos dispuestos se acumulan y que, en el software WRATE, los impactos asociados a la construcción y mantenimiento de la instalación son dependientes de la cantidad anual de residuos que ingresan, se reportaron los impactos relacionadas a estas etapas del ciclo de vida año a año tal como se genera en el modelo.
    - Para las instalaciones de aprovechamiento material y bioquímico, en las que los residuos no se acumulan, los impactos de la construcción, desmantelamiento y mantenimiento se distribuyeron a lo largo de la vida útil de la instalación, teniendo en cuenta el mayor valor de residuos dispuestos durante el periodo de análisis.
    - Las emisiones por la construcción de los contenedores requeridos para el almacenamiento de los residuos y las asociadas a la construcción y mantenimiento de los vehículos recolectores se repartieron en la vida útil de los contenedores y camiones respectivamente. Se asume que en el año base estos elementos son nuevos, por lo que su vida útil inicia en el mismo año 2018.

En las figuras a continuación se muestra el resultado de la modelación de las emisiones de GEI de las medidas propuestas y la línea base con enfoque de Análisis de Ciclo de Vida.

[13] Las emisiones se calculan utilizando los factores de potencial de calentamiento global para los GEI reportados en el Cuarto reporte IPCC (AR4).

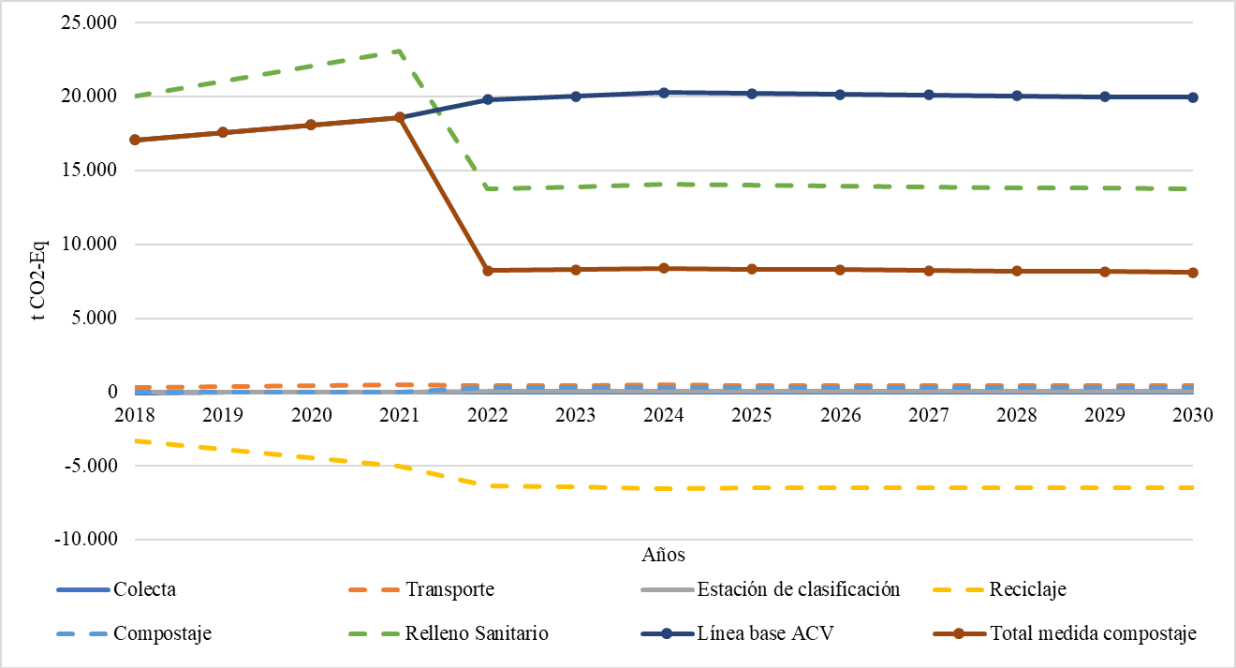


Figura 131. Perfil de emisiones Análisis de Ciclo de Vida medida compostaje descentralizado

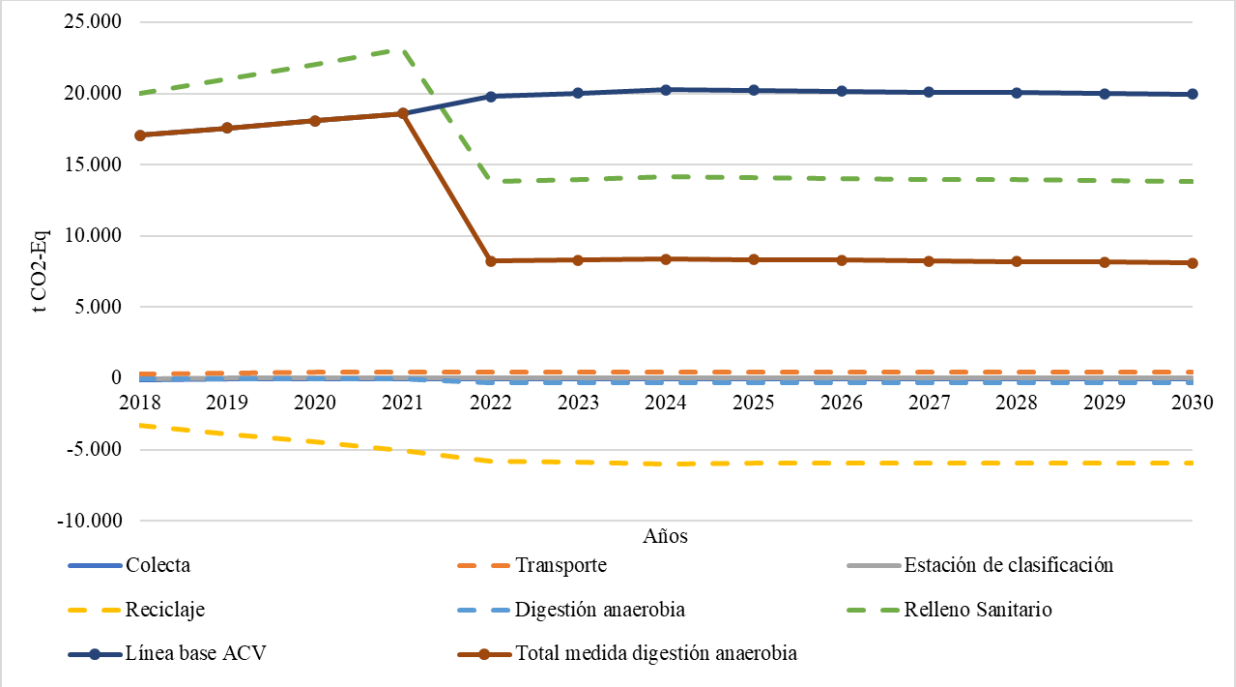


Figura 132. Perfil de emisiones Análisis de Ciclo de Vida medida digestión anaerobia

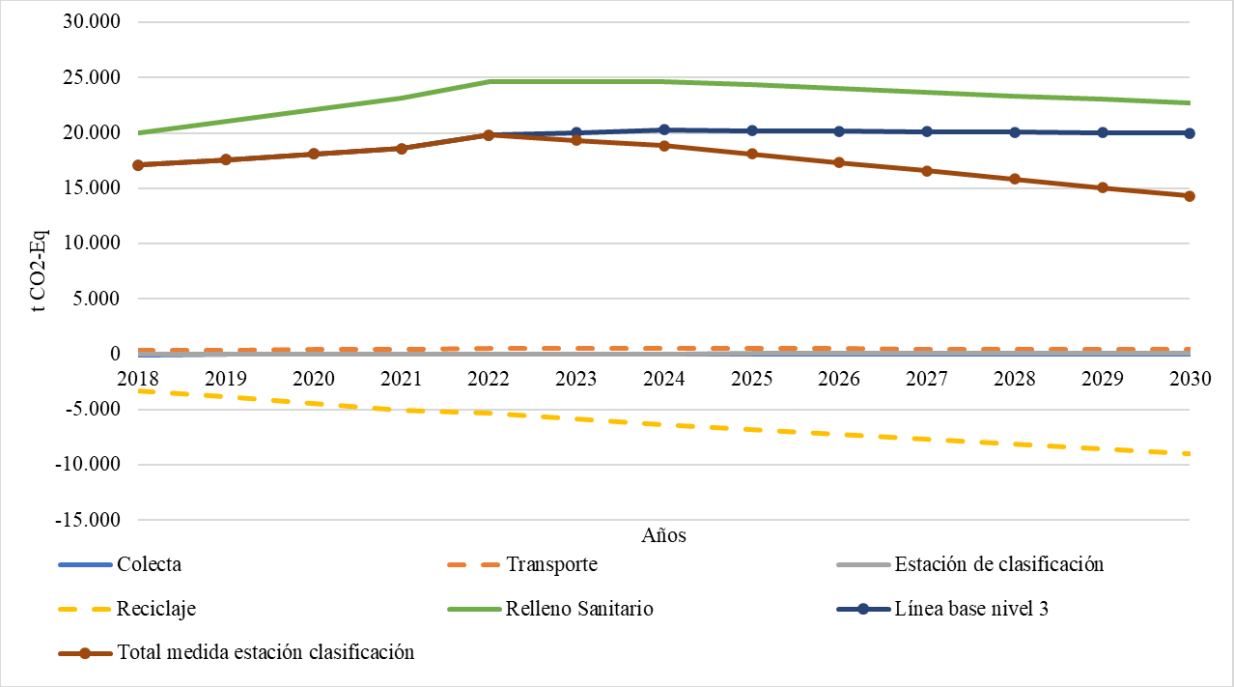


Figura 133. Perfil de emisiones Análisis de Ciclo de Vida medida estación de clasificación y aprovechamiento

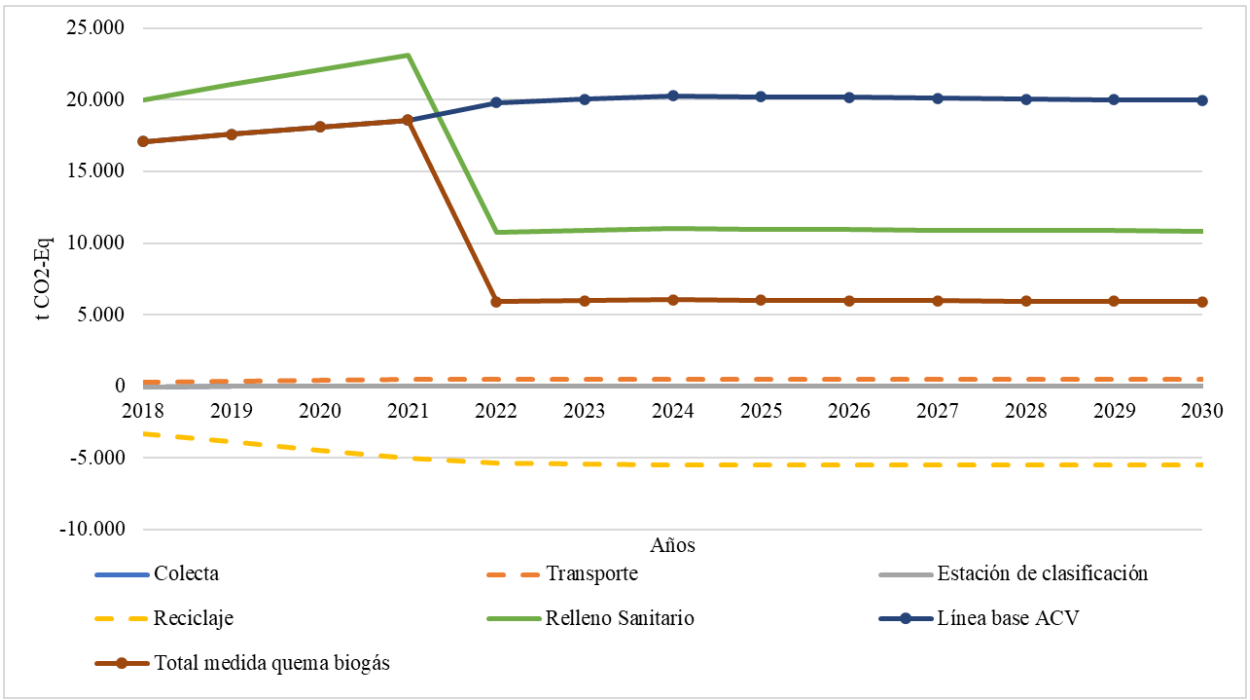


Figura 134. Perfil de emisiones Análisis de Ciclo de Vida medida quema de biogás

Además de la mitigación de emisiones de GEI, se realiza la comparación entre medidas y la línea base de otros cinco indicadores de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como se muestra en las siguientes figuras:

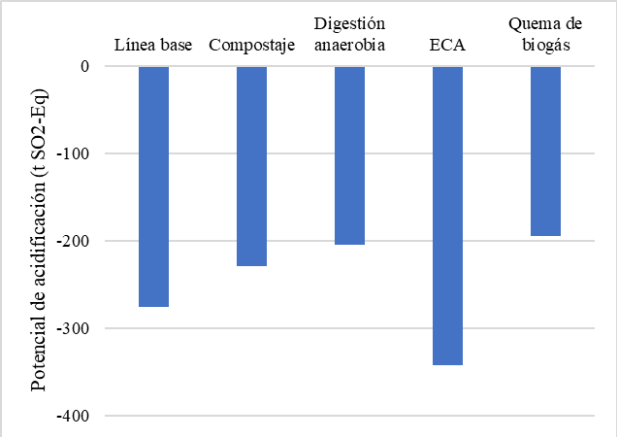


Figura 135. Comparación de Potencial de acidificación entre medidas

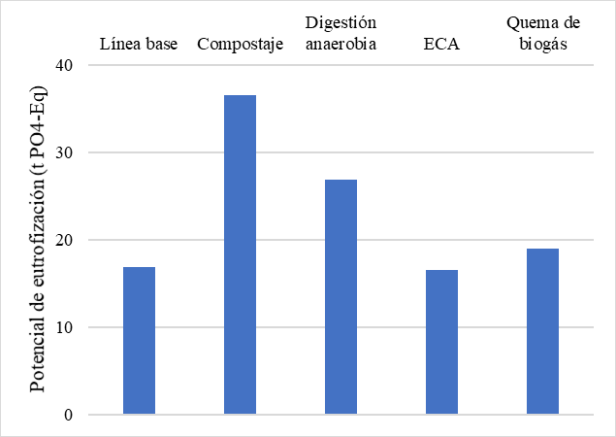


Figura 136. Comparación de Potencial de eutrofización entre medidas

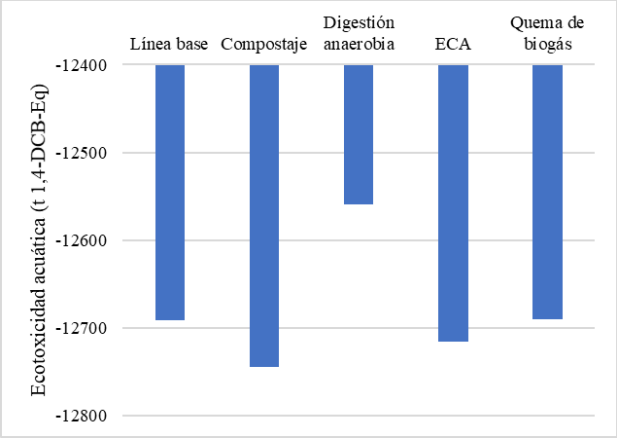


Figura 137. Comparación de Ecotoxicidad acuática entre medidas

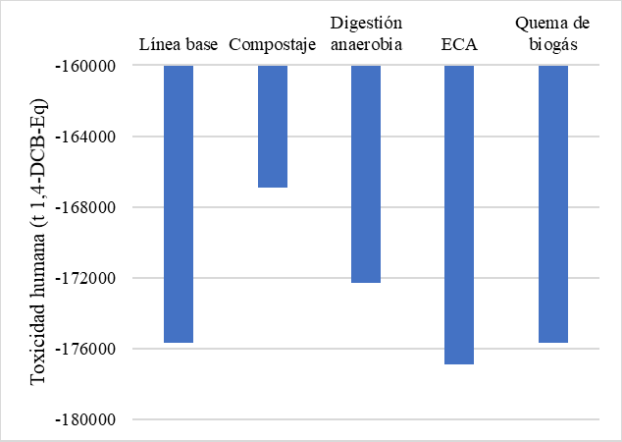


Figura 138. Comparación de Toxicidad humana entre medidas

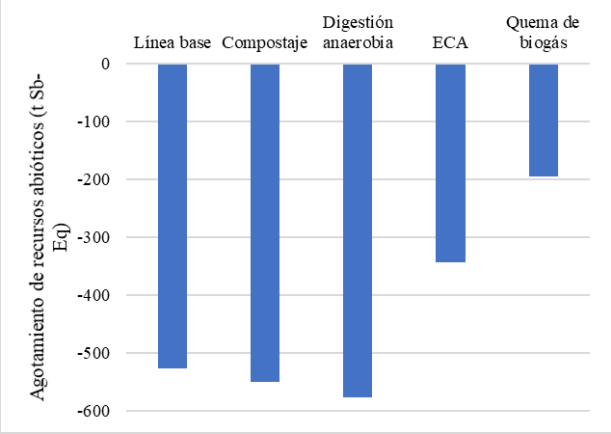


Figura 139. Comparación de Agotamiento de recursos abióticos entre medidas

Anexo 12. Metodología de ejecución de simulaciones termo energéticas de edificios de vivienda

- **Modelación energética aislada de edificaciones de vivienda**

Para poder llevar a cabo el análisis de confort térmico al interior de las unidades de vivienda se realizaron modelaciones energéticas utilizando el motor de simulación energética Energy+ [267] desarrollado por el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley del Departamento de Energía de los Estados Unidos. Como programa de interfaz gráfica se utilizó el software OpenStudio [268] con su complemento en SketchUp para visualización y edición de modelos 3D.

De acuerdo con los objetivos de este estudio se contemplaron tres casos de estudio para Ciudad Verde y Lagos de Torca. En primer lugar, se tomó el conjunto residencial Calicanto, desarrollado por la constructora Amarilo, como prototipo de vivienda VIP. Se modeló una unidad estructural representativa de una torre de 6 pisos con 4 apartamentos de 42 m^2 por nivel. El sistema constructivo de este proyecto es mampostería estructural. Asimismo, se tuvo en cuenta un segundo conjunto residencial llamado Cayena, correspondiente al prototipo de vivienda tope VIS y desarrollado por la misma constructora. Esta segunda modelación contempló una torre representativa de 12 pisos con 4 apartamentos de 57 m^2 por nivel. El sistema constructivo de este proyecto es concreto industrializado. Por último, se tomó el proyecto residencial Cerezo dentro del Plan Parcial El Otoño para la modelación del prototipo de vivienda NO VIS. La estructura modelada es una torre de 17 pisos con 8 apartamentos por nivel que varían de área entre 70 y 89 m^2. El sistema constructivo de este proyecto es concreto industrializado. Las figuras muestran un render arquitectónico por tipo de superficie para cada proyecto de estudio.

La Tabla 191 muestra las propiedades térmicas de los elementos materiales de la envolvente. Los valores de transmitancia térmica (valor U) de los materiales se calcularon a partir de dos fuentes: (1) estudio de confort térmico en vivienda social para la ciudad de Bogotá [269] y (2) la biblioteca de componentes de edificaciones (BCL) propia del software de modelación energética. Las figuras a continuación presentan un render arquitectónico por tipo de material para cada proyecto, respectivamente.

Tabla 191. Propiedades térmicas de los materiales de envolvente

Elemento	Descripción	Valor U
Ventanas	Vidrio translúcido (4mm) Coefic.ganancia térmica solar (SHGC = 0.768) Transmitancia visible (VT = 0.9)	5.700 $W/m^2 \cdot K$
Muro en ladrillo	Muro ladrillo hilera sencilla (120mm) Capa finalizado estuco (3mm)	3.174 $W/m^2 \cdot K$
Muro en concreto	Pantalla sencilla concreto (100mm) Capa finalizado estuco (3mm)	3.836 $W/m^2 \cdot K$
Losa de entrepiso	Losa concreto reforzado (100mm) Piso cerámica (3mm)	3.869 $W/m^2 \cdot K$
Losa de cimentación	Losa concreto reforzado (200mm) Piso cerámica (3mm)	2.966 $W/m^2 \cdot K$
Losa de cubierta	Losa concreto reforzado (100mm) Cavidad no ventilada (700m) Tejado metálico	2.550 $W/m^2 \cdot K$

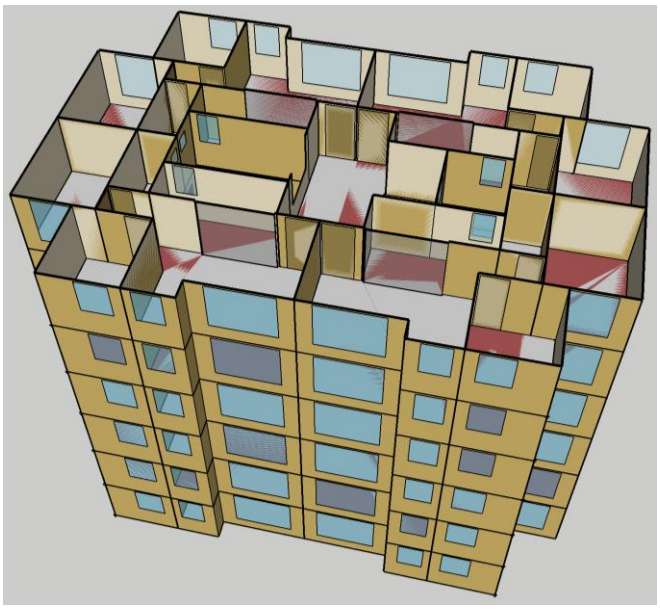


Figura 140. Tipos de superficie Proyecto Calicanto

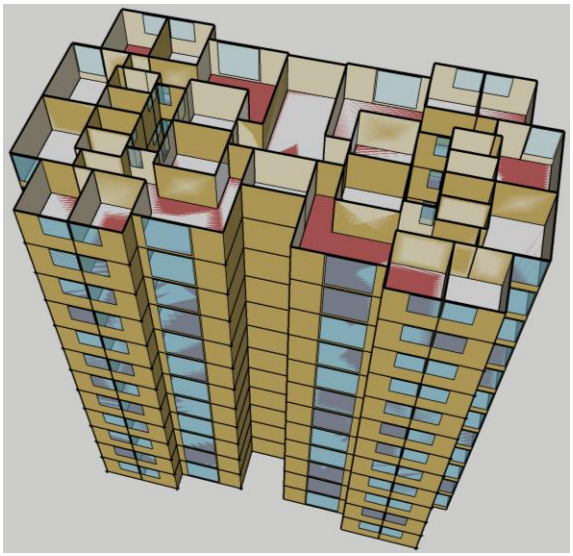


Figura 141. Tipos de superficie Proyecto Cayena

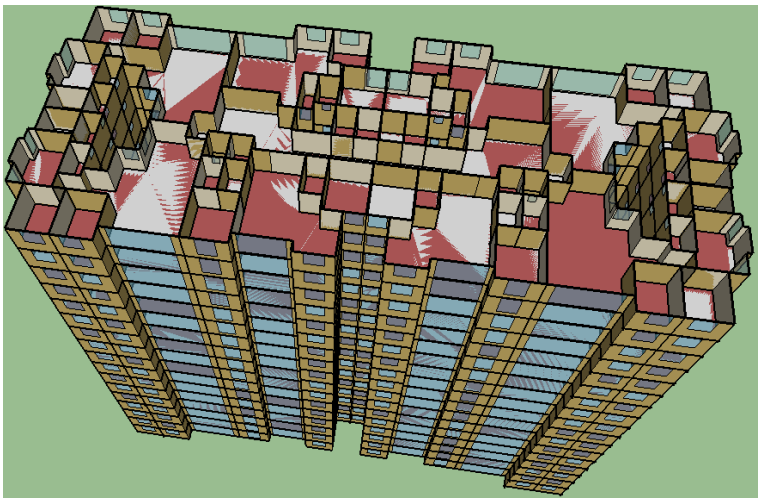


Figura 142. Tipos de superficie Proyecto Cerezo

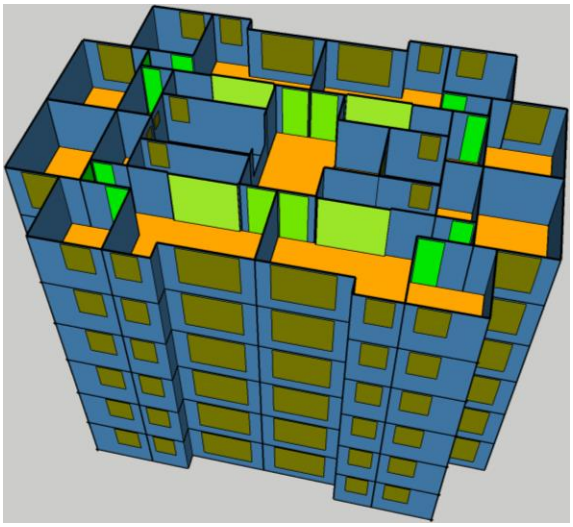


Figura 143. Materiales en Proyecto Calicanto

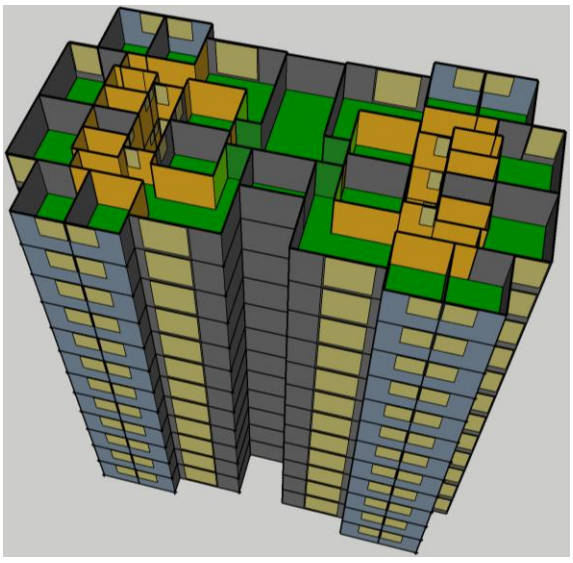


Figura 144. Materiales en Proyecto Cayena

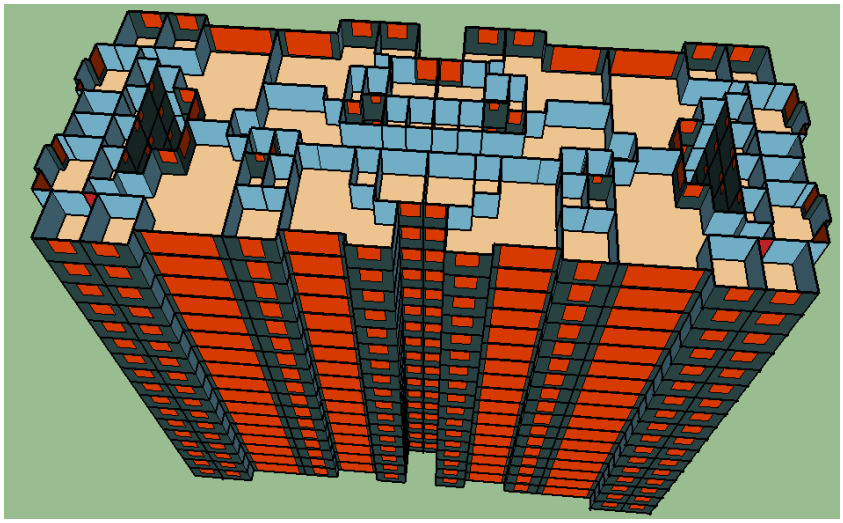


Figura 145. Materiales en Proyecto Cerezo

Para la definición de las cargas de iluminación de cada uno de los casos de simulación (potencia instalada por cada unidad de vivienda) se definió la potencia asociada a la cantidad media de bombillos para cada tipo de vivienda, y la caracterización de estos según su tecnología. Para Ciudad Verde se encontró, según la encuesta realizada, que las viviendas cuentan con 7 bombillos, con el detalle presentado en la Tabla 192. Por otro lado, para las viviendas de Lagos de Torca, al analizar los planos de algunos proyectos planeados, se determinó que para VIS y VIP se contaría con 7 bombillos por unidad de vivienda y para No VIS se contaría con 10 bombillos por unidad de vivienda. Los valores de caracterización según tecnología, presentados en la Tabla 192, son consistentes con el supuesto realizado para este caso de estudio, en el que se estima que todas las viviendas contarán desde el inicio de su operación con 100% de tecnología LED para iluminación.

Tabla 192. Caracterización carga de iluminación por caso de estudio y tipo de vivienda

Caso de estudio	**Tipo vivienda**	**# Bombillos/ und vivienda**	**Tecnología**	**Potencia/und (W)**	**Potencia instalada/ und vivienda (W)**
Ciudad Verde	VIS y VIP	4	LED	6	124
		2	Halógenos/ Ahorradores	20	
		1	Incandescentes	60	
Lagos de Torca	VIS y VIP	7	LED	6	42
	No VIS	10	LED	6	60

Las medidas de mejora de confort empleadas en este proyecto se definieron con base en trabajos previos realizados como la Guía de Sostenibilidad [270] y el Programa BEA. Para poder modelar dichas estrategias se utilizó la modalidad de mejoras de la biblioteca de componentes de edificaciones (BCL) propia del software. Este repositorio contiene distintas medidas de ahorro de energía previamente definidas por expertos. En la figura a continuación se puede observar los tipos de medida que intervienen la envolvente de una edificación.

Type	Quantity
People	2
Whole Building	31
Electric Lighting	24
Envelope	79
Construction Sets	3
Form	25
Infiltration	11
Opaque	29
Fenestration	11
Equipment	8
HVAC	99
Service Water Heating	6
Onsite Power Generation	2

Figura 146. Tipos de medidas de ahorro energía en el software

- **Modelación energética y térmica de edificaciones de vivienda en entorno construido**

La literatura discute que la forma urbana y el entorno construido de los edificios tienen una influencia importante en la eficiencia energética de estos [271]–[273], por esta razón se consideró relevante cuantificar el impacto de la forma urbana sobre el consumo de energía de las edificaciones modeladas para el caso de estudio.

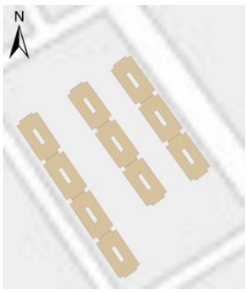
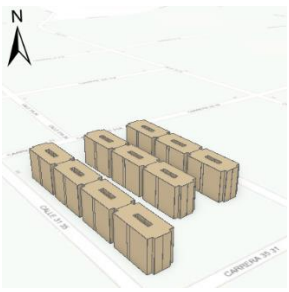
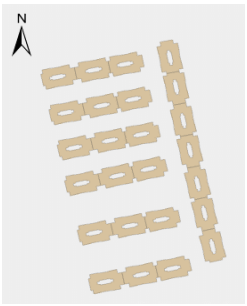
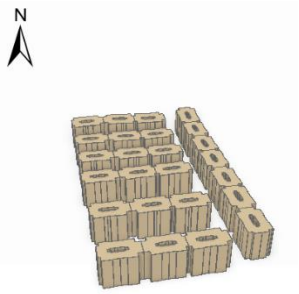
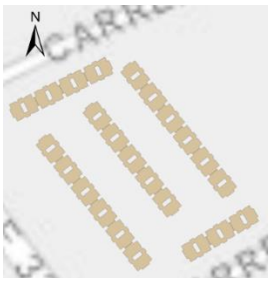
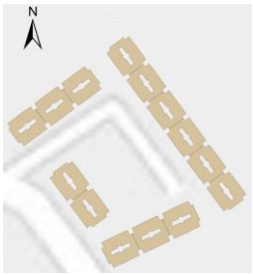
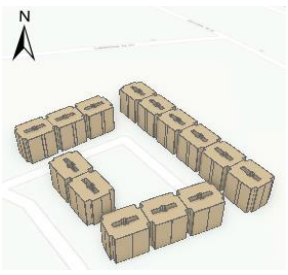
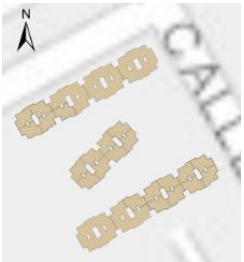
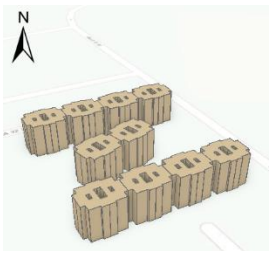
Con el fin de complementar el modelo energético de edificaciones en el que se modela con detalle la caracterización de los edificios, se decidió realizar un modelo en el que se simule el desempeño energético y se evalúen las condiciones de confort térmico de las edificaciones considerando las construcciones adyacentes, y el impacto que estas tienen sobre el consumo de energía por iluminación de espacios. En este modelo se simplifica la zonificación interna de las unidades de vivienda en los edificios a simular.

Este modelo se implementa en el mismo software utilizado en el modelo de unidades de vivienda. Se utiliza Energy+ como motor de simulación energética [267] y OpenStudio junto con su complemento de Sketchup [268] para la definición gráfica y estructuración del modelo.

Para el desarrollo del modelo se adaptó una metodología previamente implementada para la modelación energética de edificios considerando la "interacción" entre estos, en la que se considera que la relación entre el consumo de energía de un edificio y la forma en el que este se ubica entre un sistema de edificaciones se basa en la sombra y reflectancia de radiación mutua entre los edificios [274], [275]; con la salvedad que, debido a la falta de estaciones en países del trópico y la altitud del caso de estudio, no se modelan las cargas de calefacción o enfriamiento en los edificios.

Previo al desarrollo de las simulaciones fue necesario caracterizar las condiciones del entorno construido en Ciudad Verde, a nivel urbanístico y geométrico. De esta manera se definieron los casos a simular, de tal manera que se obtuviera una representatividad de las condiciones de la vivienda en Ciudad Verde. Mediante el análisis de imágenes satelitales se categorizaron las agrupaciones de viviendas en 4 configuraciones, presentadas en la Tabla 193.

Tabla 193. Categorización de edificios según forma urbana

Categoría	Esquema planta	Modelo 3D
1		
2		
3		
4		
5		

Para que los modelos realizados fueren consecuentes y representativos de los casos reales, la caracterización de materiales utilizada en este modelo corresponde a las propiedades descritas anteriormente. Así mismo, las mismas distribuciones arquitectónicas de los proyectos tipo se construyeron con base a planos arquitectónicos de proyectos de referencia, modelando bloques de edificios continuos, como se presenta en la Figura 147, para obtener una representación de la condición real de los proyectos de vivienda en el caso de estudio. Adicional a la distribución en bloque de varios edificios de vivienda también se modelan los edificios circundantes según los escenarios de simulación definidos, sobre los que se evalúa la interacción de sombra y reflectancia y las implicaciones que tienen sobre el consumo de energía para iluminación del bloque de control; como se presenta en la. Esto pretende alcanzar la mayor representatividad del modelo frente a las condiciones reales de entorno construido.

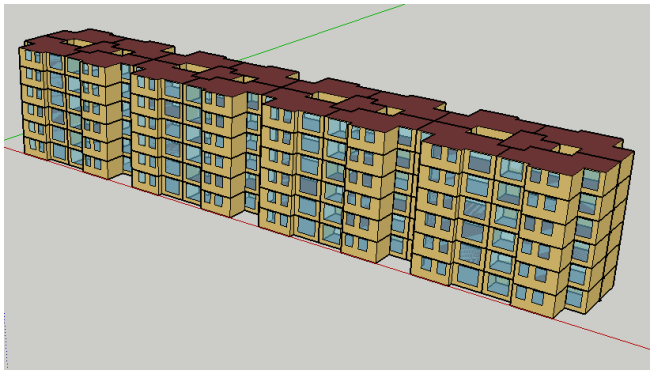


Figura 147. Modelo bloque de vivienda con 4 torres para proyecto VIS con 6 pisos (Proyecto de referencia: Calicanto)

Para garantizar la evaluación del impacto real dentro del modelo, se realizó el supuesto que en caso de contar con buenas condiciones de iluminación natural (5000 luxes) durante las horas habitadas de la vivienda, los usuarios apagarían la luz artificial. Adicionalmente, se realiza la simulación de cada escenario dos veces bajo distintas condiciones: en la primera se simula el consumo de energía del edificio en la interacción con las edificaciones adyacentes, y en la segunda se simula el edificio aislado, como si las construcciones adyacentes no existieran. De esta forma se puede evaluar la influencia de la sombra y reflectancia que ejercen las construcciones adyacentes sobre el edificio de control.