



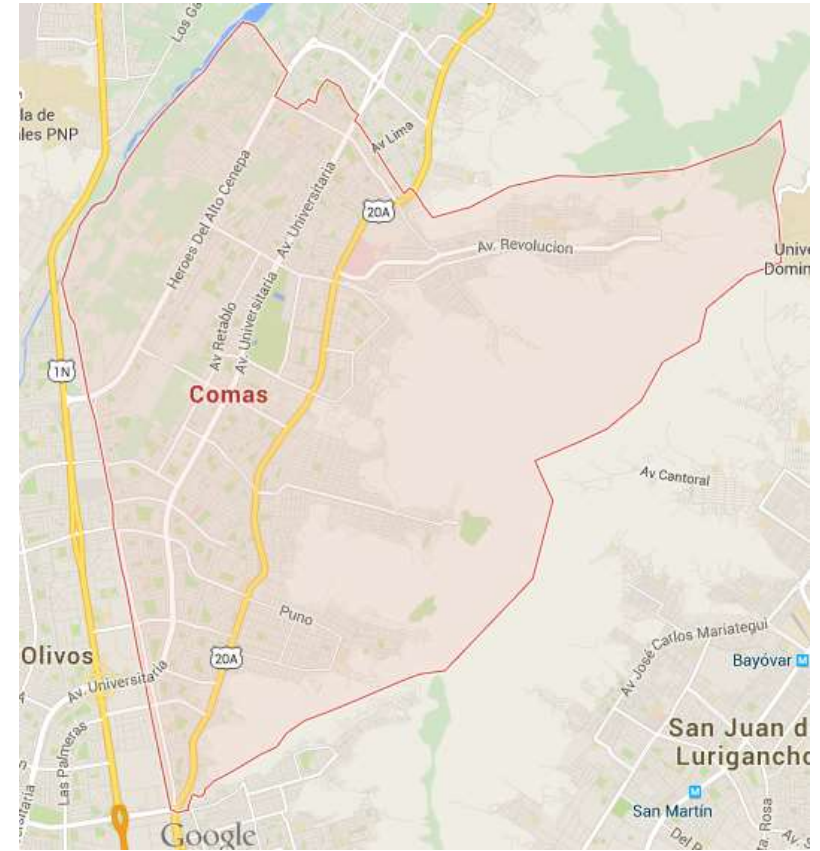
Combinando Investigación de Operaciones y Análisis de Ciclo de Vida para optimizar la recolección de residuos sólidos municipales en un distrito de Lima (Perú)

ALESSANDRO GILARDINO
JONATÁN ROJAS
IAN VÁZQUEZ
GUSTAVO LARREA
HÉCTOR MATOS

Datos del distrito en estudio



- Es el cuarto distrito más poblado del Perú.
- Al 2015 cuenta con una población de 522,000 habitantes.
- Para el año 2015 se estima gastó S/.10,000,000 en el servicio de recolección de residuos.



Fuente: Google Maps

Objetivos del estudio



- **Objetivo General:**

- Proponer un plan de mejora en la gestión de residuos del distrito en estudio para mejorar la calidad de vida, la imagen y disminuir los costos relacionados a la gestión de residuos sólidos.

- **Objetivos específicos:**

- Proponer algoritmos y metodologías para mejorar la gestión de residuos sólidos del distrito en estudio.
- Desarrollar un análisis ambiental y contrastarla con la situación actual para probar la viabilidad de la propuesta.

Herramientas utilizadas

Investigación de Operaciones



- Técnicas basadas en sistemas de información, métodos estadísticos, técnicas de ingeniería, evaluación económica y procesamiento de datos
- Se apoya en la formulación matemática para buscar el mejor diseño para un sistema.

Penalty Function Methods

□ We seek

$$\min_{x \in R^n} F(x)$$

subject to

$$c(x) = 0 \in R^m$$

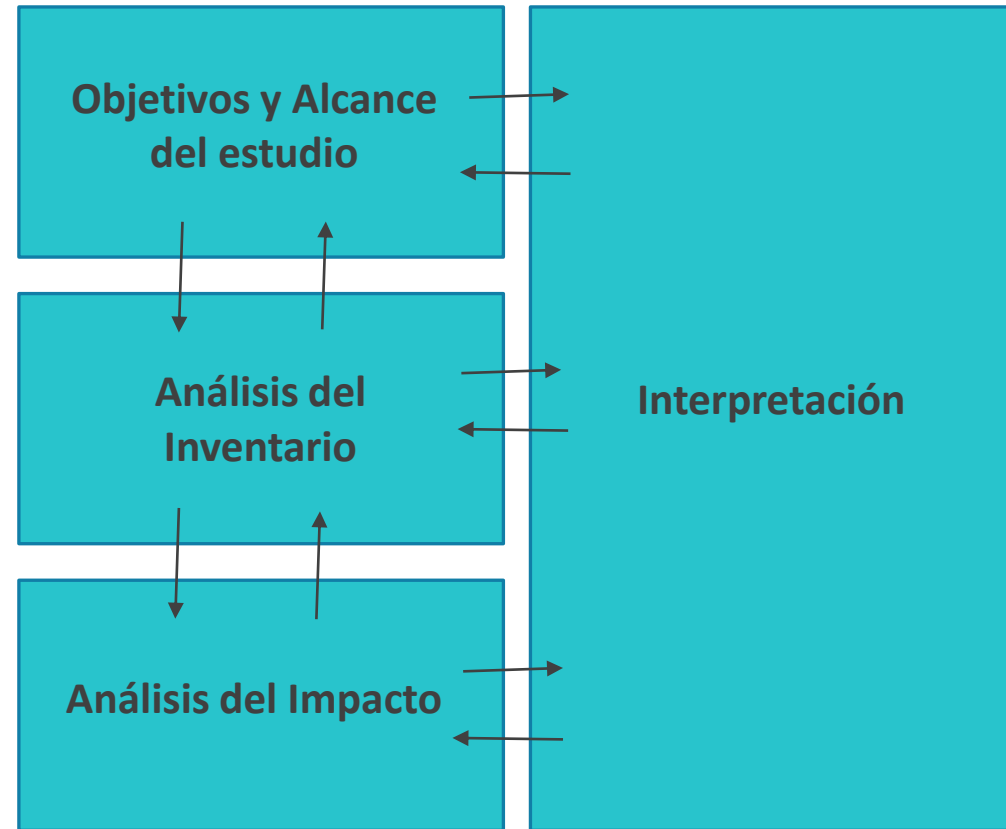
□ Consider the unconstrained

Herramientas utilizadas

Análisis de Ciclo de Vida



- El ACV es una técnica utilizada para evaluar los aspectos ambientales y energéticos de un producto
- Definición y lineamientos normados en: ISO 14040:2006 & 14044:2006.



Fuente: ISO 14040

Metodología

Algoritmo de localización de contenedores



$$\text{Minimize } w = \sum_{j \in S} \sum_{m \in M} z_{jm} + \sum_{j \in S} \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} y_{jlp}$$

Subject to

$$\sum_{j \in S} x_{ij} = 1, \quad i \in C$$

$$\sum_{m \in M} z_{jm} \leq 1, \quad j \in S$$

$$\sum_{i \in C} q_i * x_{ij} \leq \left(\sum_{m \in M} z_{jm} * c_m \right) * Q_{cont} * P_{max}, \quad j \in S$$

$$\sum_{h: d_{ij} + \delta < d_{ih}} x_{ih} \leq 1 - \sum_{m \in M} z_{jm} \quad i \in C, \quad j \in S$$

$$d_{ij} * x_{ij} \leq D_{max} + \delta_i, \quad i \in C, j \in S$$

$$\delta_i \leq 30$$

Restricciones para contenedores de residuos generales

$$\sum_{j \in S} x_{rij} = 1, \quad i \in C$$

$$\sum_{p \in P} y_{jlp} \leq 1, \quad l \in L, j \in S$$

$$y_{jlp} - y_{jnp} = 0, \quad p \in P, l \in L, n \in L, j \in S, l \neq n$$

$$\sum_{i \in C} q_{ri} * x_{rij} \leq \left(\sum_{p \in P} y_{jlp} * c_p \right) * Q_{cont} * P_{max}, \quad l \in L, j \in S$$

$$\sum_{h: d_{ij} + \delta < d_{ih}} x_{rih} \leq 1 - \left(\sum_{p \in P} \sum_{l \in L} y_{jlp} \right) * 0.25 \quad i \in C, \quad j \in S$$

$$d_{ij} * x_{rij} \leq D_{max} + \delta_{ri}, \quad i \in C, j \in S$$

$$\delta_{ri} \leq 30$$

Restricciones para contenedores de residuos reciclables

$$\sum_{l \in L} \sum_{p \in P} y_{jlp} * 0.25 + \sum_{m \in M} z_{jm} \leq 1, \quad j \in S$$

Metodología

Algoritmo de localización de contenedores



- Minimizar la cantidad de puntos de recolección
 - Usar al máximo la capacidad de los contenedores.
 - Asegurarse que las personas no caminen más de 200 metros.
 - Asignar todas las personas a un lugar de recolección.

Metodología

Algoritmo de ruteo de vehículos



- Se creó un algoritmo que permita desarrollar rutas de recolección para recolectar los residuos generales y reciclables.
- El algoritmo básicamente desarrolla los siguientes pasos:
 - Paso 1: Buscar el contenedor más cercano
 - Paso 2: Analizar si hay capacidad y tiempo disponible para visitar ese contenedor.
 - Paso 3: En caso se tenga capacidad y tiempo agregar el contenedor a la ruta.
 - Paso 4: Regresar al paso 1.

Metodología

Análisis de Ciclo de Vida



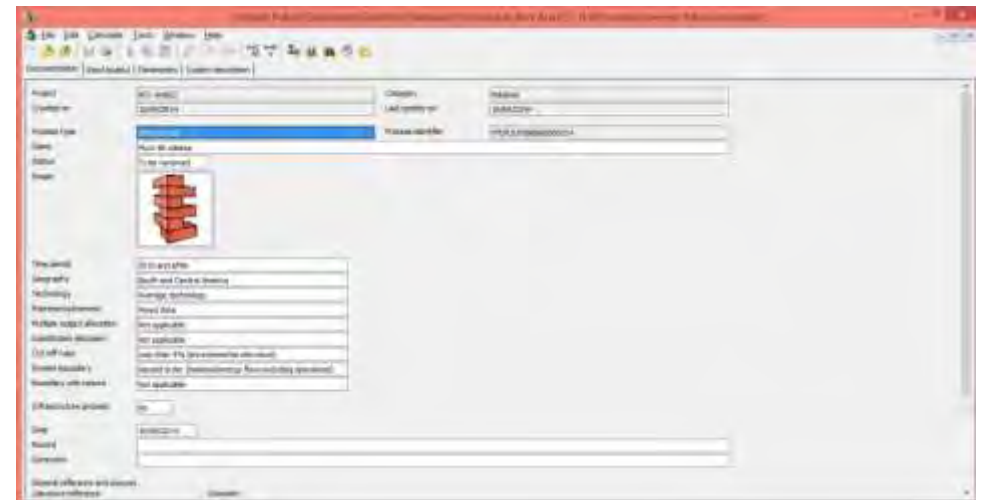
- Uso de software: SimaPro 8.0.5.13
- Uso de base de datos: EcoInvent v3.0
- Trabajo con: procesos unitarios

SimaPro

Fuente: <https://www.surveymonkey.com/r/?sm=LcW7PIVuNZCqprayP0xxA%3D%3D>



Fuente: <https://www.pre-sustainability.com/ecoinvent-v3-what-is-new>



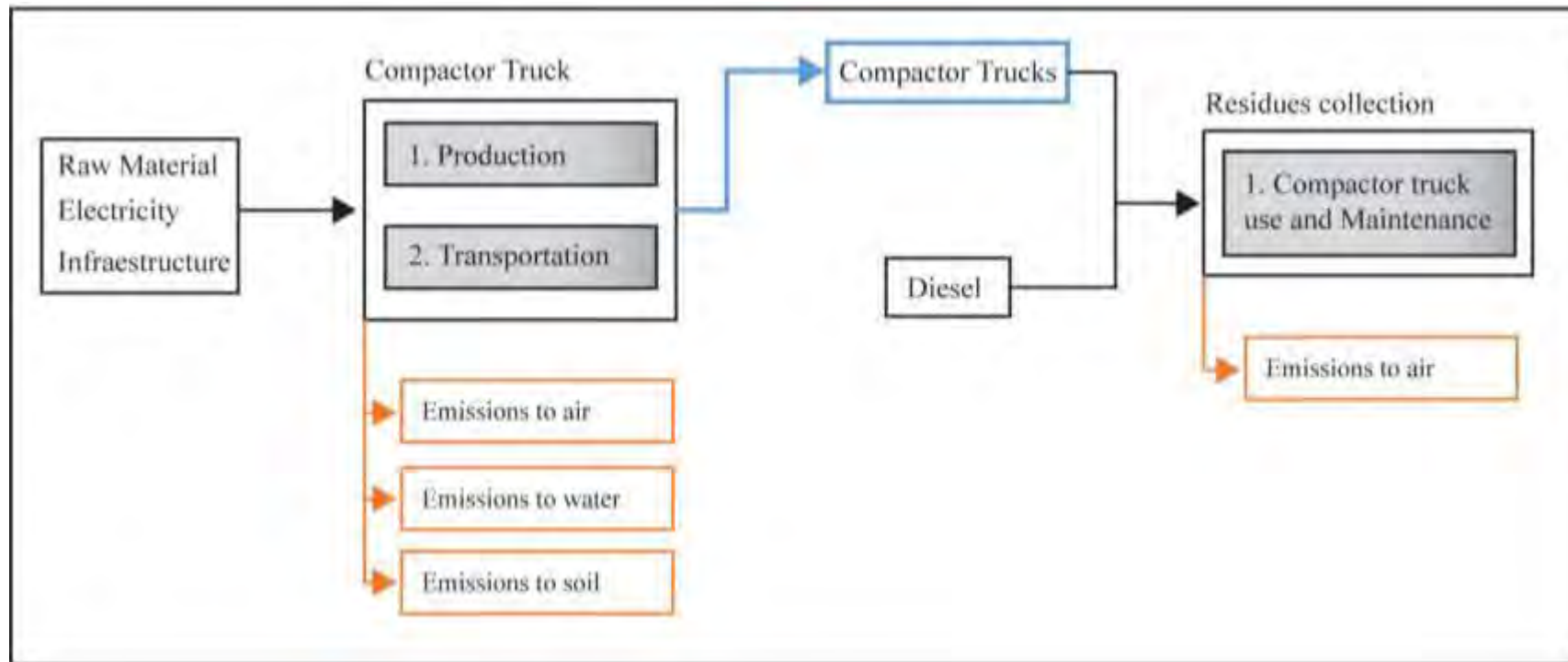
Fuente: Software SimaPro 8.0.5.13

Metodología

Análisis de Ciclo de Vida



- Límites del sistema considerados para la situación actual:

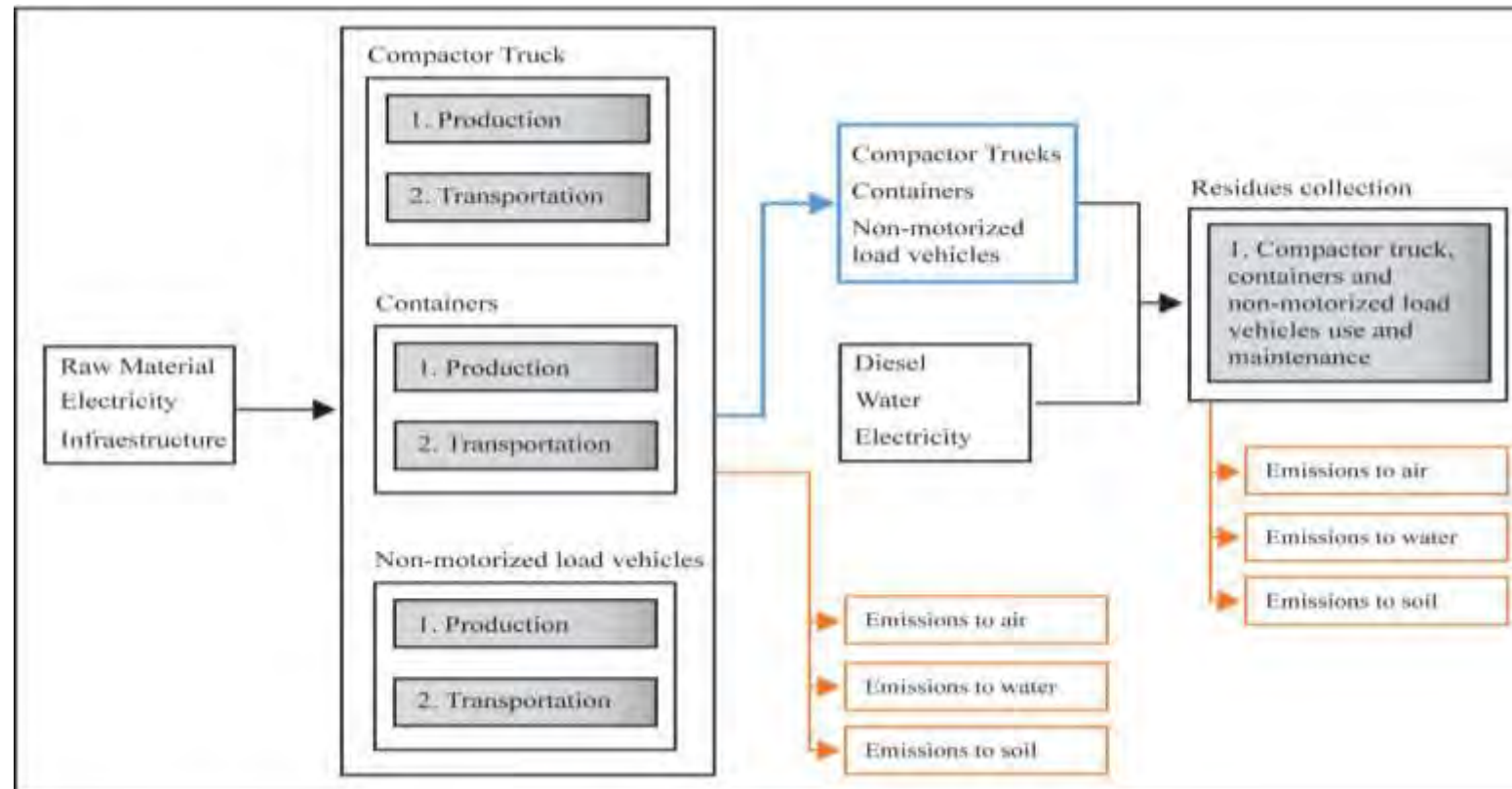


Metodología

Análisis de Ciclo de Vida



- Límites del sistema considerados para la situación propuesta:



Metodología

Análisis de Ciclo de Vida: Análisis de sensibilidad



- El análisis de sensibilidad permite conocer como se desempeñaría el sistema si hubieran variaciones en las condiciones iniciales.
- Para el presente estudio se propusieron 5 escenarios.
- Escenario 1 (A1): No se da mantenimiento a los contenedores.
- Escenario 2 (B1): Llenado del camión compactador al 80%.
- Escenario 3 (B2): Llenado del camión compactador al 90%.
- Escenario 4 (B3): Llenado del camión compactador al 100%.
- Escenario 5 (C1): Cambio en la tecnología e los vehículos (Euro 4).

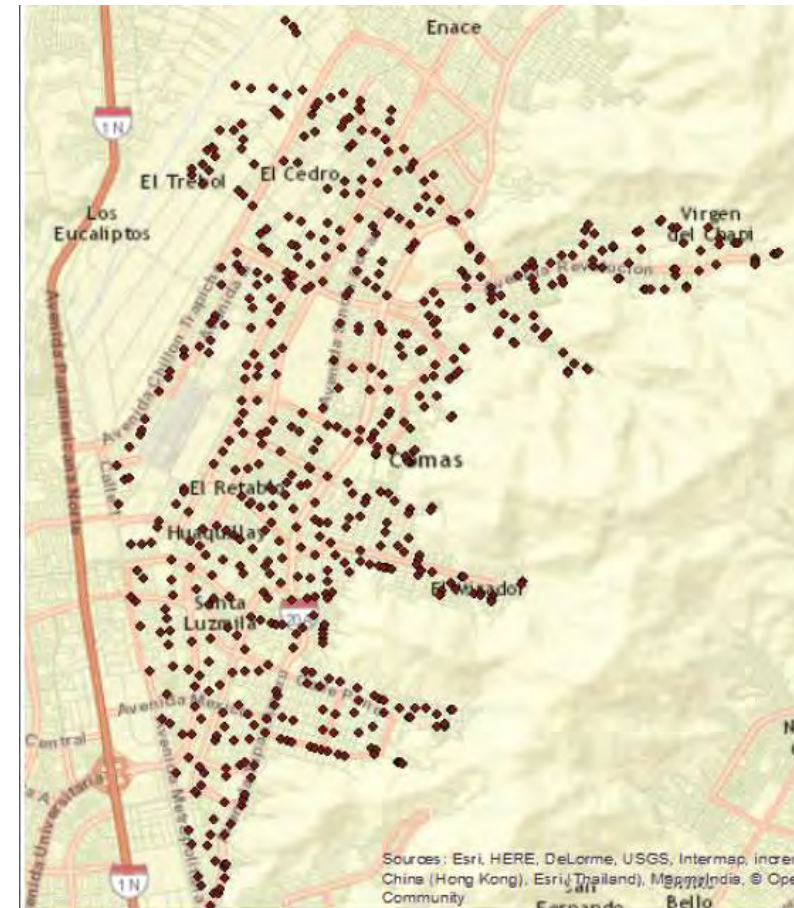
Resultados

Localización de contenedores



Contenedores de residuos generales

- Puntos de recolección: 602
- Cantidad de contenedores: 2334



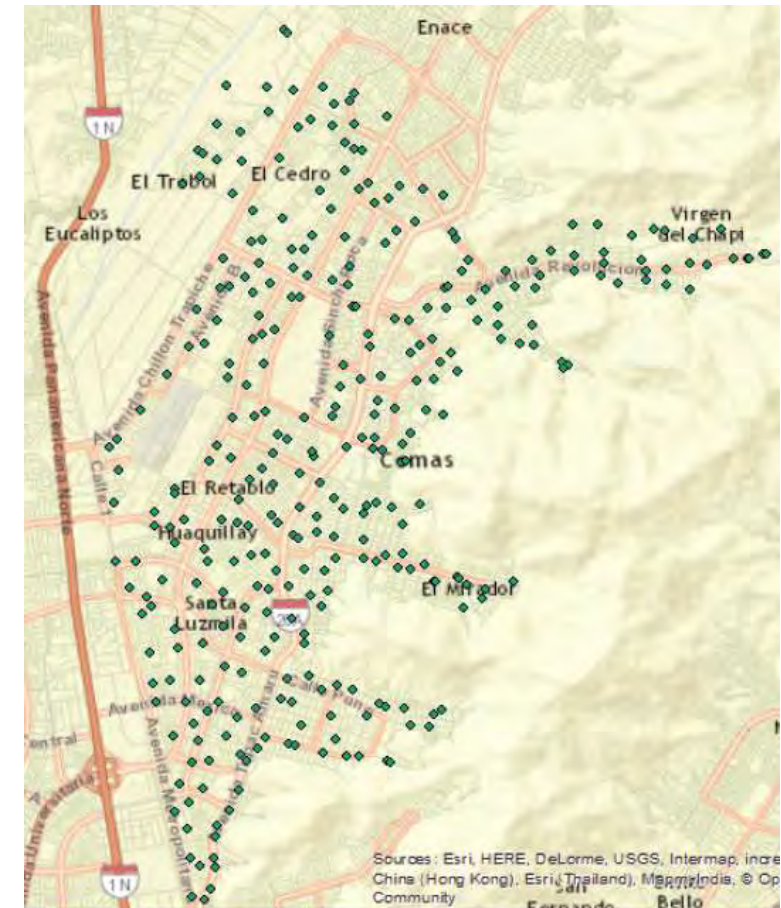
Resultados

Localización de contenedores



Contenedores de residuos reciclables

- Puntos de recolección: 328
- Cantidad de contenedores: 1262



Resultados

Ruteo de vehículos



Recolección de contenedores de residuos generales

- Capacidad de los camiones: 57000 Lt.
- Tiempo de trabajo: 8 horas y media.
- Número de rutas: 13.
- Número de camiones: 7.

Recolección de contenedores de residuos reciclables

- Capacidad de los vehículos: 6000 Lt.
- Tiempo de trabajo: 8 horas.
- Número de rutas: 27.
- Número de vehículos: 6.

Resultados

Análisis de Ciclo de Vida



Impact category	Current situation	Proposal	Variation	Scenario 1		Scenario 2						Scenario 3	
				A1	Variation	B1	Variation	B2	Variation	B3	Variation	C1	Variation
Global warming	3.190	2.780	-13%	3.550	11%	2.903	-9%	2.800	-12%	2.706	-15%	2.780	-13%
Photochemical oxidation	0.020	0.014	-28%	0.017	-12%	0.015	-23%	0.015	-26%	0.014	-29%	0.013	-34%
Acidification	0.023	0.016	-31%	0.020	-14%	0.017	-24%	0.016	-28%	0.016	-31%	0.014	-41%
Particulate material	0.009	0.006	-35%	0.007	-23%	0.006	-30%	0.006	-33%	0.006	-35%	0.005	-41%
Water depletion	0.021	0.056	167%	0.026	23%	0.057	171%	0.056	169%	0.056	167%	0.056	167%
Metal depletion	0.507	0.254	-50%	0.265	-48%	0.261	-48%	0.257	-49%	0.253	-50%	0.254	-50%
Fossil depletion	1.176	1.258	7%	1.819	55%	1.323	12%	1.285	9%	1.249	6%	1.258	7%

Conclusiones



1. El sistema de recolección de residuos por contenedores permite tener disminuciones de hasta un 13% en categorías de impacto como calentamiento global, teniendo mejoras sustanciales en casi todas las categorías a excepción de uso de agua y uso de combustibles fósiles.
2. Sería importante incluir dentro del estudio la disposición final en el relleno sanitario de los residuos generales y el reciclaje de los residuos reciclables, pero por falta de datos no se incluyeron.