



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y SISTEMAS
ICS1113-OPTIMIZACIÓN

Informe - Entrega 2

Reciclaje puerta a puerta Grupo 26

Maximiliano Felipe Aguirre 19207115 Sección 1
Marina Juliette Contreras Lafaury 20641206 Sección 3
Simón Agustín Martínez Quezada 21638799 Sección 1
Andrés Alejandro Soto Zapata 20206615 Sección 1
Miguel Alemparte Larrazabal 20206216 Sección 1
Diego Caracci Silva 20203268 Sección 1

Fecha entrega: 24 de mayo de 2022

1. Descripción del problema

La implementación de la economía circular es un problema relevante tanto a nivel nacional como internacional dado que la cantidad de basura acumulada en nuestro planeta va aumentando cada vez más. Actualmente en Chile, se generan 8 millones de toneladas de residuos (Sinia, 2020), de los cuales solo se recicla un 1,8 % (Valenzuela, 2021). Al compararla con las cifras de países desarrollados, como Alemania o Austria, que reciclan por sobre el 50 % de sus desechos (Eunomia, 2017), esta cifra es mínima. Es por esto que el reciclaje debe ser un tema central para nuestro país, especialmente teniendo en consideración que estos números no han mejorado en los años de pandemia.

1.1. La realidad chilena

En Chile, las razones principales por las cuales las personas no reciclan están intrínsecamente relacionadas con la falta de infraestructura. Efectivamente, “45 % de los municipios en Chile no tienen un servicio de reciclaje municipal” (Valenzuela, 2021). Además, del 55 % que declaran tener reciclaje, el rango en el cual reciclan es muy distinto. Para ciertas comunas, tener reciclaje significa solamente tener algunos puntos limpios, mientras que para otras, significa tener un servicio de retiro de reciclaje domiciliario. Entonces, a pesar de que los chilenos quieran reciclar, no siempre tienen las facilidades para hacerlo. De hecho, según estudios, el 38,5 % de la gente no recicla porque “no hay dónde reciclar” (Cedeus, 2019) y porque no es práctico llevar el reciclaje al punto limpio. Las pocas municipalidades que han implementado un sistema de reciclaje puerta a puerta (Las Condes, Vitacura, Lo Barnechea) resuelven la necesidad de puntos limpios y evitan las molestias de transportar los residuos, esta idea ha servido de inspiración para un modelo que puede mejorarse y ampliarse a otras comunas.

Sin duda, gestionar la recolección de residuos reciclables en cada comuna requiere una gran inversión y un alto grado de organización logística, por lo que parece muy relevante optimizar esta recolección logrando minimizar los costos de la mejor manera posible. Es decir, el objetivo es ser un aporte para los municipios a lo largo de todo el país.

2. Elección del problema

Dado todo el contexto, es claro que se necesita reducir la cantidad de residuos desechados para aportar como país a este problema global, por eso que se decidió modelar un sistema de reciclaje domiciliario que recoge residuos para reciclar casa por casa con un sistema de camiones y los deje en el punto limpio de cada comuna, con el objetivo de minimizar los costos de la municipalidad para llevar a cabo este proceso, tomando como supuesto que la municipalidad es encargada de este.

2.1. Suposiciones del modelo

Para resolver este problema debemos considerar algunas decisiones que serán relevantes en el proceso. Debemos decidir cuántos camiones salen a las calles cada día, si cada camión recoge o no los residuos reciclables en cada casa, cuántos recolectores y conductores trabajarán cada día, a donde se dirige el camión después de salir del punto limpio y de cada casa y si hay que comprar un basurero de reciclaje para las casas.

A fin de resolver este desafío, también es necesario establecer ciertos parámetros. Primero que todo, suponemos que la municipalidad entrega a cada casa un basurero, el cual tiene un costo asociado. Luego, suponemos que la municipalidad tiene una cierta cantidad de camiones disponibles, y que cada uno de estos camiones tienen un cierto costo asociado, que incluye la mantención y la bencina usada dependiendo de la cantidad de casas por las que pasa. Además, suponemos que hay

trabajadores disponibles, tanto conductores como recolectores, con sus sueldos respectivos e implementos necesarios para trabajar en estos camiones.

Luego, asumimos que tanto los camiones como los puntos limpios tienen una capacidad máxima, siendo la de los puntos limpios suficiente para sostener a la comuna. Además suponemos que los camiones comienzan y terminan su recorrido en un punto limpio, que cada casa llena un basurero a la semana, y que un día de trabajo corresponde a una jornada laboral, no a las 24 horas del día.

Las restricciones que definimos para el problema son que no se pueden utilizar más camiones de los que hay disponibles, el camión no puede transportar más residuos de lo que permite su capacidad y debe volver al punto limpio cada vez que alcance esta, los camiones deben recolectar todas las casas de la comuna sin repetir ninguna de estas, debe haber un conductor y dos recolectores por cada camión, la recolección de residuos no se realiza los días domingos, cada punto limpio tiene su capacidad máxima que no puede ser superada, todas las casas deben tener su basurero especial de reciclaje y los implementos de trabajo deben ser suficientes para todos los trabajadores.

Al lograr reducir estos costos, se generaría un gran beneficio para la municipalidad, gastando la menor cantidad posible de dinero para aumentar la cantidad de reciclaje en la comuna, incrementando así tanto el porcentaje de reciclaje como la calidad de vida de los habitantes de la comuna. Si se aplica este sistema en todas las comunas del país, se espera que todas las personas que no podían reciclar antes por falta de infraestructura lo puedan hacer con este sistema de reciclaje a domicilio. Así, el reciclaje aumentaría cerca de un 38 % en las comunas que no contaban con reciclaje a domicilio. Entonces, si estas cifras se replican a nivel nacional, Chile tendría cifras de reciclaje comparables con los países con mayor porcentaje de reciclaje a nivel mundial.

2.2. Externalidades cuantificadas

Para cuantificar las externalidades positivas que generaría la aplicación de este sistema, se consideró el dato planteado anteriormente de generación de basura a nivel nacional (8 millones de toneladas anuales). Se obtuvo que materiales reciclables como el papel, cartón, metal y vidrio representan el 22.7 % de toda la basura recolectada en el país (ISPH, 2016). Siendo el 18,8 % de cartón y papel, 2,3 % de metal y 1,6 % de vidrio. El reciclaje de una tonelada de cartón y papel, una tonelada de metal y de una tonelada de vidrio evita la emisión de 0.9, 0.3 y 1.67 toneladas de CO₂, respectivamente. Aplicando estos datos a las cantidades totales de basura generada de cada material reciclable, según sus porcentajes, se tiene que el reciclaje anual de papel y cartón, metal y vidrio previene la emisión de 1353600, 38400 y 307280 toneladas de CO₂, respectivamente. Por lo tanto, se ahorrarían 1660880 toneladas de CO₂ anualmente. Con la ley de Impuesto verde, que entró en vigor en Chile a partir del 2017, se pueden cuantificar económicamente las emisiones de CO₂. Con el valor de 5 dólares por tonelada de CO₂ emitida (BCN, 2018), se tiene el valor de 8,3 millones de dólares ahorrados anualmente por el reciclaje integral de los materiales mencionados anteriormente.

2.3. Datos reales utilizados

Para realizar un modelamiento real de este problema, se decidió utilizar datos de la comuna de Puente Alto, debido a que es una de las comunas con mayor generación de residuos por persona. Actualmente, la comuna de Puente Alto no tiene un sistema de reciclaje puerta a puerta. Oficialmente, existe reciclaje en la comuna, pero este consiste en solamente 5 puntos limpios para 568.106 habitantes (INE, 2017). Dado que no existen datos correspondientes a esta comuna para la infraestructura necesaria al reciclaje, se usaron los datos conocidos de la recolección de basura, ya que muchos de los implementos utilizados son parecidos y conocidos. Así, según la página oficial de la municipalidad de Puente Alto, para la recolección de basura, se usan 40 camiones con una capacidad de 18 toneladas. También es importante notar que la comuna de Puente Alto tiene 171.155 viviendas, según el censo de 2017.

En el cálculo del costo fijo de recorrer de una casa a otra se consideró que, en promedio, un camión recolector consume 1,45 litros de diesel por kilómetro (Hernández, 2012), y que el precio del diesel es de 941,6 pesos por litro, de acuerdo con Global Petrol Prices (2022). Luego, también es necesario saber que distancia recorre un camión recolector entre cada casa. Una casa promedio en Puente Alto alcanza unos 44 m² (Fundación Sol, 2020). Por lo tanto, para modelar la distancia de una casa a otra, se asumirá una casa de contorno cuadrado, con un lado de aproximadamente 6,63 m. Entonces, con los datos presentados se tiene que el precio de recorrer de una casa a otra es de 9,05 pesos.

Aparte de los datos específicos a la columna de Puente Alto, también hay que considerar los costos de los implementos mínimos requeridos por los trabajadores, como zapatos y overol, entre otros. Para realizar las estimaciones de estos costos, se investigó un total de 6 implementos con su precio asociado (mascarilla, overol, chaleco reflectante, gorro legionario, guantes y zapatos de seguridad) estos datos se encuentran en el anexo. Dado que estos implementos se gastan con el uso diario, se asume que se deben renovar cada cierto tiempo. Así, los zapatos tienen que reemplazar cada 6 meses, los overoles cada mes, los guantes cada semana, los chalecos reflectantes cada mes, los gorros legionarios cada 6 meses y las mascarillas cada día. Finalmente, el costo diario por trabajador asociado a implementos es de 475.

Al considerar el costo del reciclaje, también hay que considerar que los trabajadores, es decir, los conductores de camión y los recolectores de basura (reciclaje en este caso) reciben un sueldo. Usando nuevamente los datos conocidos de la recolección de basura, se tiene que, en promedio, un conductor de camión de basura tiene un sueldo de 590.000 pesos mensuales, mientras que un recolector de basura tiene un sueldo mensual de 352.500 pesos chilenos. Para implementar estos datos al modelo, se calcula el sueldo diario que representaría, suponiendo que estos sueldos de trabajadores de recolección de la basura se pueden aplicar también para los trabajadores de la recolección de reciclaje, como son labores comparables. Así, un conductor de camión de reciclaje y un recolector de reciclaje tendrían un sueldo diario de 24.500 pesos y 14.600 pesos, respectivamente.

Como ya se mencionó anteriormente, la comuna de Puente Alto cuenta con 5 puntos limpios con una capacidad de 1.300 toneladas de residuos mensuales. Para calcular el costo de ir desde una casa hasta un punto limpio, se consideraron estos 5 puntos limpios y la casa más lejana a cada uno de ellos, esto para obtener un rango y considerar todas las distancias posibles que podría recorrer un camión desde una casa hasta un punto limpio, o vice versa. Todos los datos mencionados anteriormente se encuentran en el archivo dato.xlsx adjunto.

3. Modelación del problema

3.1. Subíndices

- Camiones: $i \in \{1, \dots, I\}$
- Casas: $j \in \{1, \dots, J\}$
- Días: $t \in \{1, \dots, 7\}$
- recolectores: $m \in \{1, \dots, M\}$
- Conductores: $n \in \{1, \dots, N\}$
- Puntos limpios $p \in \{1, \dots, P\}$

3.2. Parámetros

- A : número máximo de camiones i
- B_i : Capacidad máxima del camión i
- H_p : Capacidad Punto limpio p

- C : Precio de un basurero de reciclaje
- S_{nt} : Sueldo diario de cada conductor n
- S_{mt} : Sueldo diario de cada recolector m
- f : Costo promedio de viajar entre casas
- f_{jp} : Costo de viajar de la casa j al punto limpio p .
- E : kg de residuos reciclables por basurero (1 basurero por casa)
- G : Casas en la comuna
- L_{mt} : Implementos usados por el recolector m en el día t
- L_{nt} : Implementos usados por el conductor n en el día t
- O_t : Costos de implementos de trabajadores en el día t

3.3. Variables

- $X_{it} = \begin{cases} 1 & \text{Si se usa el camión } i \text{ en el día } t \\ 0 & \text{e.o.c.} \end{cases}$
- $Y_{ijt} = \begin{cases} 1 & \text{Si la casa } j \text{ fue recolectada en el día } t \text{ por el camión } i \\ 0 & \text{e.o.c.} \end{cases}$
- $W_{mt} = \begin{cases} 1 & \text{Si el recolector } m \text{ trabaja el día } t \\ 0 & \text{e.o.c.} \end{cases}$
- $Z_{nt} = \begin{cases} 1 & \text{Si el conductor } n \text{ trabaja el día } t \\ 0 & \text{e.o.c.} \end{cases}$
- $V_{ijt} = \begin{cases} 1 & \text{Si el camión } i \text{ después de pasar por la casa } j \text{ recolecta otra casa el día } t \\ 0 & \text{e.o.c.} \end{cases}$
- $U_{ijtp} = \begin{cases} 1 & \text{Si } j \text{ es la primera casa recolectada por el camión } i \text{ el día } t, \text{ desde el punto limpio } p \\ 0 & \text{e.o.c.} \end{cases}$
- $T_{ijtp} = \begin{cases} 1 & \text{Si } j \text{ es la última casa recolectada por el camión } i \text{ el día } t, \text{ antes de ir al punto limpio } p \\ 0 & \text{e.o.c.} \end{cases}$
- $R_j = \begin{cases} 1 & \text{Si se compra un basurero de reciclaje para la casa } j \\ 0 & \text{e.o.c.} \end{cases}$
- Q_{itp} = Cantidad de veces que pasa el camión i por el punto limpio p el día t

3.4. Función Objetivo

$$\text{Min} \left(\sum_{t=1}^7 \left(\sum_{i=1}^I \left(\sum_{j=1}^J \left(\sum_{p=1}^P \left(U_{ijtp} \cdot f_{jp} + T_{ijtp} \cdot f_{jp} \right) + V_{ijt} \cdot f \right) \right) + \sum_{m=1}^M W_{mt} (S_{mt} + O \cdot L_{mt}) + \sum_{n=1}^N Z_{nt} (S_{nt} + O \cdot L_{nt}) \right) \right)$$

3.5. Restricciones

1. No se puede exceder el máximo de camiones disponibles:

$$\sum_{i=1}^I X_{it} \leq A \quad \forall t \in \{1, \dots, 7\}$$

2. No superar la carga máxima del camión, si pasa por un punto limpio se puede volver a llenar:

$$\sum_{j=1}^J Y_{ijt} E \leq B_i (1 + \sum_{p=1}^P Q_{itp}) \quad \forall t \in \{1, \dots, 7\}, \quad i \in \{1, \dots, I\}$$

3. Los camiones deben recolectar todas las casas en la semana:

$$\sum_{t=1}^7 \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J Y_{ijt} = G$$

4. Para que no se repitan, no puede pasar mas de un camión por la misma casa mas de una vez por semana:

$$\sum_{t=1}^7 Y_{ijt} = 1 - \sum_{t=1}^7 Y_{\alpha jt} \quad \forall i \in \{1, \dots, I\}, \quad j \in \{1, \dots, J\}, \alpha \neq i \subseteq \{1, \dots, I\}$$

5. Para cada camión deben haber al menos 1 conductor:

$$\sum_{n=1}^N Z_{nt} \geq \sum_{i=1}^I X_{it} \quad \forall t \in \{1, \dots, 7\}$$

6. Para cada camión deben haber al menos 2 recolectores:

$$\sum_{m=1}^M W_{mt} \geq 2 \sum_{i=1}^I X_{it} \quad \forall t \in \{1, \dots, 7\}$$

7. Para cumplir con las jornadas laborales de conductores y recolectores, no se recolectan casas los Domingos:

$$X_{i7} = 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, I\}$$

8. La cantidad de residuos recolectado debe ser menor a la capacidad del punto limpio:

$$\sum_{t=1}^7 \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J Y_{ijt} E \leq \sum_{p=1}^P H_p$$

9. Se debe comprar un basurero de reciclaje por casa para poder llevar a cabo la recolección:

$$\sum_{j=1}^J R_j = G$$

10. Los implementos usados por los conductores el día t deben ser suficientes para cada trabajador:

$$\sum_{n=1}^N Z_{nt} \leq \sum_{n=1}^N L_{nt} \quad \forall t \in \{1, \dots, 7\}$$

11. Los implementos usados por los recolectores el día t deben ser suficientes para cada trabajador:

$$\sum_{m=1}^M W_{mt} \leq \sum_{m=1}^M L_{mt} \quad \forall t \in \{1, \dots, 7\}$$

12. Para poder pasar por las casas el camión i debe estar funcionando:

$$Y_{ijt} \leq X_{it} \quad \forall i \in \{1, \dots, I\} \forall j \in \{1, \dots, J\}, \forall t \in \{1, \dots, 7\}$$

13. Para poder pasar por una casa después de la casa j , el camión debe pasar primero por j :

$$V_{ijt} \leq Y_{ijt} \quad \forall i \in \{1, \dots, I\}, \forall j \in \{1, \dots, J\}, \forall t \in \{1, \dots, 7\}$$

14. Para que j pueda ser la primera casa después del punto limpio p de ese día t , el camión debe pasar por j ese día:

$$U_{ijtp} \leq Y_{ijt} \quad \forall i \in \{1, \dots, I\}, \forall j \in \{1, \dots, J\}, \forall t \in \{1, \dots, 7\}, \forall p \in \{1, \dots, P\}$$

15. Para que j pueda ser la última casa antes del punto limpio p de ese día t , el camión debe pasar por j ese día:

$$T_{ijtp} \leq Y_{ijt} \quad \forall i \in \{1, \dots, I\}, \forall j \in \{1, \dots, J\}, \forall t \in \{1, \dots, 7\}, \forall p \in \{1, \dots, P\}$$

16. Después de salir de cada punto limpio p , el camión i debe recolectar la primera casa j del recorrido:

$$\sum_{j=1}^J U_{ijtp} = 1 \quad \forall i \in \{1, \dots, I\}, \forall t \in \{1, \dots, 7\}, \forall p \in \{1, \dots, P\}$$

17. Antes de llegar a un punto limpio p , el camión i debe recolectar la última casa j del recorrido:

$$\sum_{j=1}^J T_{ijtp} = 1 \quad \forall i \in \{1, \dots, I\}, \forall t \in \{1, \dots, 7\}, \forall p \in \{1, \dots, P\}$$

18. Naturaleza de las variables

$$\begin{aligned} R_j &\in \{0, 1\} & \forall j \in \{1, \dots, J\} \\ X_{it} &\in \{0, 1\} & \forall i \in \{1, \dots, I\}, \forall t \in \{1, \dots, 7\} \\ Z_{nt} &\in \{0, 1\} & \forall n \in \{1, \dots, N\}, \forall t \in \{1, \dots, 7\} \\ W_{mt} &\in \{0, 1\} & \forall m \in \{1, \dots, M\}, \forall t \in \{1, \dots, 7\} \\ Y_{ijt} &\in \{0, 1\} & \forall i \in \{1, \dots, I\}, \forall j \in \{1, \dots, J\}, \forall t \in \{1, \dots, 7\} \\ V_{ijt} &\in \{0, 1\} & \forall i \in \{1, \dots, I\}, \forall j \in \{1, \dots, J\}, \forall t \in \{1, \dots, 7\} \\ U_{ijtp} &\in \{0, 1\} & \forall i \in \{1, \dots, I\}, \forall j \in \{1, \dots, J\}, \forall t \in \{1, \dots, 7\}, \forall p \in \{1, \dots, P\} \\ T_{ijtp} &\in \{0, 1\} & \forall i \in \{1, \dots, I\}, \forall j \in \{1, \dots, J\}, \forall t \in \{1, \dots, 7\}, \forall p \in \{1, \dots, P\} \\ Q_{itp} &\in R & \forall i \in \{1, \dots, I\}, \forall t \in \{1, \dots, 7\}, \forall p \in \{1, \dots, P\} \end{aligned}$$

4. Implementación en Gurobi

Para verificar el funcionamiento del modelo, se utiliza el software de Gurobi. En este, primeramente se definen los subíndices y sus respectivos conjuntos. Para definir estos datos se utilizaron los valores descritos en la sección anterior. Para el precio de los implementos de seguridad se calculó aproximadamente el precio que este tendría por día de uso, con estos datos se estableció un rango para el precio mínimo y máximo, con este rango se ejecutó la función `random.randint` para obtener un valor de costo de implemento. Se programaron las variables, restricciones y función objetivo del problema, obteniendo así el valor óptimo de 78463.0 pesos.

Vale recalcar que para esta primera modelación en el software se omitieron las restricciones 4,16 y 17, ya que al implementarlas en el modelo, se obtiene una solución **infeasible**. Asimismo, como se trata de una de las comunas más pobladas de Chile, se decidió tomar el 3 % de las casas por razones de eficiencia computacional.

Tabla 1: Test Gurobi

Porcentaje de casas	Numero de casas	Costo optimo (clp)	Tiempo de ejecución en segundos
0.1	171	108539.0	12
0.2	343	131532.0	25
0.3	515	131532.0	39
0.4	686	117336.0	63
0.5	858	87291.0	78
0.6	1029	128668.0	83
0.7	1201	102326.0	92
0.8	1372	119647.0	123
0.9	1543	152537.0	166
1	1715	77326.0	197
2	3430	83414.0	329
3	5145	78463.0	587

5. Bibliografía

BCN. 2018. Asesoría Técnica Parlamentaria: Implementación del Impuesto Verde en Chile. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/26723/1/BCN___Implementacion_de_Impuesto_Verde_en_Chile.pdf

Cedeus. 2019. Las 10 comunas que generan más basura por persona al día. <https://www.cedeus.cl/ranking-comunas-generan-basura-persona-cedeus-residuos/>

Eunomia. 2017. Recycling-Who really leads the world? <https://www.eunomia.co.uk/reports-tools/recycling-who-really-leads-the-world-issue-2/>

Fundación Sol. 2020. Hacinamiento y COVID-19: Hogares de Vitacura tienen en promedio 18 m² más por integrante que los de Puente Alto. <https://fundacionsol.cl/blog/actualidad-1/post/hacinamiento-y-covid-19-hogares-de-vitacura-tienen-en-promedio-18-m2-mas-por-integrante-que-los-de-~:text=Muestra%20que%2C%20si%20bien%20en,una%20media%20de%2044%20m2>

Hernández. D., 2012. Optimización del sistema de recolección de residuos sólidos del cantón de Montes de Oca, San José, Costa Rica. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3076/optimizacion_sistema_recoleccion_residuos_solidos.pdf?sequence=1&isAllowed=y

INE. 2017. Censo de población y vivienda. Santiago: Instituto Nacional de Estadísticas.

ISPCH. 2016. Guía para el control de la exposición a diferentes riesgos de trabajadores del sector de recolección de residuos domiciliarios. <https://www.ispch.cl/sites/default/files/D028-PR-500-02-001%20Guia%20recoleccion%20residuos%20domiciliarios.pdf>

Sinia. 2020. Tercer Informe del Estado del Medio Ambiente (IEMA). https://sinia.mma.gob.cl/index.php/iema_2020/

Valenzuela. N., 2021. Reciclaje domiciliario en Chile: queremos, pero no nos dejan. <https://www.ciperchile.cl/2021/04/09/reciclaje-domiciliario-en-chile-queremos-pero-no-nos-dejan/>