

Optimizing paper collection routes: A nonlinear programming approach in a recycling company

Leon Castro, Rocio¹, Cercado Encalada, Gino², Elías Robles, José³, Hallasi Quispe, Brenda⁴, Sevillano Díaz, Nayelli⁵, Vicario Acho, Adrián⁶
Universidad Privada del Norte, Perú, rocio.leon@upn, n00207069@upn.pe, n00379794@upn.pe, n00226843@upn.pe, n00409617@upn.pe, n00371609@upn.pe

1 Docente. Ingeniería Industrial. Universidad Privada del Norte.
2-6 Estudiantes. Ingeniería Industrial. Universidad Privada del Norte.

Abstract: Efficiency in the collection of recyclable waste is a critical component for strengthening circular economy models in emerging markets. In this context, Traperos de Emaús faces increased operating costs and unnecessary extensions to its paper collection routes, resulting from empirical routes and limited logistical planning. This study develops a nonlinear programming model to optimize these routes, integrating vehicle capacity constraints, operating times, and sustainability criteria, with the aim of evaluating its impact on reducing distances and costs. The proposed methodology employs the Evolutionary algorithm from the Solver plugin, selected for its ability to solve complex global search problems and its suitability for non-convex objective functions. Comparative scenarios between the current operation and the optimized sequence were modeled, allowing for the precise quantification of logistical improvements. The results show significant reductions in transport kilometers: 35.90% for unit TM1 and 12.95% for TM2, in addition to a streamlining of routes that reduces overlaps, redundancies, costs, and unproductive time. Taken together, the findings demonstrate that optimization through nonlinear programming is an effective tool for enhancing collection efficiency, consolidating data-driven logistics decisions, and strengthening operational sustainability in recycling organizations.

Keywords: Nonlinear Programming, Transportation Cost Minimization, Waste Paper Collection, Circular Economy, Environmental Performance Optimization.

Optimización de rutas de recogida de papel: Un enfoque de programación no lineal en una empresa de reciclaje

Leon Castro, Rocio del Carmen¹, Cercado Encalada, Gino², Elías Robles, José³, Hallasi Quispe, Brenda⁴,
Sevillano Díaz, Nayelli⁵, Vicario Acho, Adrián⁶

Universidad Privada del Norte, Perú, rocio.leon@upn, n00207069@upn.pe, n00379794@upn.pe, n00226843@upn.pe, n00409617@upn.pe,
n00371609@upn.pe

1 Docente. Ingeniería Industrial. Universidad Privada del Norte.
2-6 Estudiantes. Ingeniería Industrial. Universidad Privada del Norte.

Resumen: La eficiencia en la recolección de residuos reciclables constituye un componente crítico para fortalecer los modelos de economía circular en mercados emergentes. En este contexto, Traperos de Emaús enfrenta incrementos en los costos operativos y extensiones innecesarias en los recorridos de acopio de papel, derivadas de rutas empíricas y una limitada planificación logística. El presente estudio desarrolla un modelo de programación no lineal orientado a optimizar dichas rutas, integrando restricciones de capacidad vehicular, tiempos operativos y criterios de sostenibilidad, con el objetivo de evaluar su impacto en la reducción de distancias y costos. La propuesta metodológica emplea el algoritmo Evolutionary del complemento Solver, seleccionado por su capacidad para resolver problemas complejos de búsqueda global y su adecuación frente a funciones objetivo no convexas. Se modelaron escenarios comparativos entre la operación actual y la secuencia optimizada, permitiendo cuantificar mejoras logísticas con precisión operativa. Los resultados evidencian reducciones significativas en los kilómetros de transporte: 35.90% para la unidad TM1 y 12.95% para TM2, además de una racionalización de los trayectos que disminuye solapamientos, redundancias costos y tiempos improductivos. En conjunto, los hallazgos demuestran que la optimización mediante programación no lineal es una herramienta eficaz para potenciar la eficiencia del acopio, consolidar decisiones logísticas basadas en datos y fortalecer la sostenibilidad operativa en organizaciones dedicadas al reciclaje.

Palabras clave: Programación no lineal, Minimización de costos de transporte, Recolección de papel usado, Economía circular, Optimización del desempeño ambiental.

I. INTRODUCCIÓN

La transición hacia modelos logísticos sostenibles ha adquirido gran relevancia debido al aumento de los costos de transporte, la presión ambiental y la necesidad de fortalecer la economía circular. Diversas investigaciones resaltan que la modernización del reciclaje mediante innovaciones tecnológicas permite optimizar el flujo de materiales y mejorar la valorización de residuos [1], mientras que la gestión eficiente de desechos complejos evidencia la importancia de sistemas logísticos más racionales [2]. Además, modelos de distribución sostenible aplicados a la última milla demuestran que rutas optimizadas reducen significativamente consumo energético y huella ambiental [3]. En regiones industriales, evaluaciones de desempeño confirman que la logística verde requiere métricas sólidas y planificación rigurosa [4], lo que coincide con estudios que proponen rutas más eficientes mediante inteligencia artificial [5]. A su vez,

enfoques basados en simulación refuerzan la utilidad de modelos híbridos para mejorar decisiones operativas en la gestión de residuos [6].

Las limitaciones en la recolección tradicional, caracterizadas por rutas extensas y dispersión de puntos de acopio, generan ineficiencias que afectan la sostenibilidad del sistema. Esto se refleja en estudios que destacan la necesidad de fortalecer el control de emisiones y la recuperación de recursos mediante procesos logísticos reestructurados [7], así como en análisis que identifican brechas en la aplicación de modelos circulares debido a fallas en la planificación operativa [8]. Propuestas que buscan optimizar tratamientos ambientales también refuerzan la importancia de aplicar metodologías técnicas rigurosas [9], complementándose con modelos predictivos que permiten anticipar comportamientos en sistemas de residuos [10]. A nivel urbano, se identifican desafíos sociales y operativos en la organización de rutas y segregación [11], mientras que estudios de valorización energética evidencian el beneficio de integrar flujos logísticos más eficientes en vertederos [12].

La literatura reciente confirma que la optimización del transporte es esencial para reducir costos, tiempos y distancias. La aplicación de modelos matemáticos en rutas de acopio de residuos sólidos demuestra la capacidad de disminuir recorridos y mejorar la asignación de recursos [13], lo cual coincide con análisis que utilizan algoritmos evolutivos para resolver problemas complejos de disposición final [14]. A su vez, enfoques de optimización multivariable han sido aplicados con éxito para mejorar sistemas de infraestructura sostenible [15] y herramientas digitales como los gemelos digitales permiten simular dinámicas logísticas bajo múltiples restricciones [16]. Además, los modelos jerárquicos ecoeficientes fortalecen la toma de decisiones en la cadena de suministro [17], mientras que la reutilización de aguas proyecta la necesidad de sistemas logísticos más eficientes para soportar prácticas circulares [18]. A nivel global, transformaciones como la prohibición china de importar residuos obligan a reorganizar rutas y rediseñar sistemas locales de reciclaje [19], lo que se complementa con estudios que aplican modelos predictivos avanzados para optimizar el aprovechamiento de subproductos [20] y metodologías experimentales para maximizar rendimientos en procesos

de transformación [21], así como evaluaciones críticas de políticas que revelan la necesidad de planificación logística más eficiente [22].

El estudio propone optimizar las rutas de acopio de papel reciclado de Traperos de Emaús mediante un modelo de programación no lineal resuelto con el método Evolutionary, con el fin de reducir distancias y costos operativos de transporte. Para ello se formula un modelo matemático que integra capacidades de carga, tiempos de recolección y criterios de sostenibilidad. Finalmente, se evaluará si la ruta óptima generada reduce significativamente la distancia total y los costos, manteniendo la eficiencia operativa y alineándose con los principios de economía circular de la empresa.

II. Consejos Útiles

La presente investigación propone la mejora de la eficiencia operativa del proceso de acopio de papel reciclado en la empresa Traperos de Emaús, mediante la implementación de un modelo de optimización de rutas.

A. Programación no lineal

Es un método de optimización de restricciones debido a que tanto las restricciones como la función objetivo son no lineales. En los escenarios seleccionados, los resultados de la simulación muestran que el método propuesto ofrece resultados prometedores [24].

B. Evolutionary

Pertenece a la familia de algoritmos evolutivos. Su objetivo es encontrar la mejor solución a un problema minimizando o maximizando una función objetivo, mediante operaciones inspiradas en la evolución biológica, como la mutación, la recombinación y la selección [25].

1. Diagnóstico inicial del proceso productivo

Para esta investigación se empleó la técnica del Enfoque Progresivo, la cual comprende cuatro etapas metodológicas que permiten pasar del diagnóstico inicial hasta la evaluación de los resultados obtenidos tras la optimización de las rutas logísticas. En esta etapa se realizó el análisis del sistema actual de recolección y transporte de papel reciclado. Para ello, se midió las rutas operativas aproximadas. Elaborando un cuadro con el estado actual del sistema logístico, representando gráficamente las rutas empleadas por los camiones y la ubicación de los puntos de acopio en la Tabla 1.

TABLA 1
ESTADO ACTUAL DE LAS RUTAS

Camion	Puntos atendidos
TM1	PA-1, PA-2, PA-3, PA-4, PA-5, PA-6, PA-7, PA-8, PA-9, PA-10, PA-11, PA-12, PA-13, PA-14, PA-15, PA-16, PA-17, PA-18, PA-19, PA-20, PA-21, PA-22, PA-23
TM2	PA-1, PA-2, PA-3, PA-4, PA-5, PA-6, PA-7, PA-8, PA-9, PA-10, PA-11, PA-12, PA-13, PA-14, PA-15

2. Elaboración del Mapa del Estado Actual (Current State Map)

Esto nos permitió visualizar desde una mejor perspectiva las rutas actuales del TM1 y TM2. Para ello, se utilizó Google Maps y Google Earth a fin de determinar las

distancias aproximadas entre la planta de reciclaje, ubicada en Villa el Salvador, y los distintos puntos de acopio. Estos valores fueron registrados en una matriz para poder cuantificar las distancias y establecer los indicadores base para la comparación futura. En la Fig. 1 y Fig. 2, se pueden observar el mapa de los puntos de acopio.



Fig. 1, Mapa actual de puntos de acopio de papel reciclado y de planta de reciclaje del vehículo TM1 (Fuente: Google Earth)



Fig. 2, Mapa actual de puntos de acopio de papel reciclado y de planta de reciclaje del vehículo TM2 (Fuente: Google Earth)

3. Elaboración de Matriz de Kilómetros

En esta fase se construyeron las matrices de distancias correspondientes a los vehículos TM1 y TM2. Para ello, se recrearon los recorridos entre los puntos de acopio de cada zona, obteniendo las distancias reales de las carreteras mediante Google Maps y registrándolas tramo a tramo. Posteriormente, dicha información fue organizada en formato matricial para cada vehículo.

Las distancias obtenidas constituyen los parámetros del modelo de optimización y permiten calcular la distancia total asociada a cualquier secuencia de visita. De este modo, el modelo determina la ruta más corta dentro de cada zona utilizando datos reales de la red vial.

En este contexto, la Tabla 2 corresponde a la zona atendida por TM1, mientras que la Tabla 3 representa los distritos asignados a TM2.

La Tabla 2 muestra la matriz de distancias en kilómetros correspondiente al vehículo TM1. En ella, las filas y columnas representan los puntos de recolección y la planta de reciclaje, de modo que cada elemento cuantifica la distancia real entre cada punto. Esta representación matricial permite modelar el problema de ruteo en Solver, ya que traduce la red vial en parámetros numéricos utilizables dentro del modelo de optimización.

Al estar organizada en ese formato y contener todas las combinaciones posibles de desplazamiento entre nodos, la matriz garantiza que cualquier secuencia de visita generada por el algoritmo pueda ser evaluada en términos de distancia total recorrida. De esta manera, se asegura consistencia matemática entre los datos empíricos obtenidos y la formulación del modelo no lineal.

TABLA 2
MATRIZ TM1 CONVERTIDA A KILOMETROS

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
	Origen / Destino	Planta (VES)	VMT	SJM	Chorrillos	Barranco	Surquillo	Miraflores	San Borja	San Luis	La Molina	Ate	Santa Anita	El Agustino	La Victoria	Lince	San Isidro	San Miguel	Pueblo Libre	Magdalena del Mar	Cieneguilla	Santiago de Surco	Lurin
1	Planta (VES)	0.00	43.80	10.70	13.50	23.30	20.30	21.10	19.80	21.70	25.70	32.70	26.70	26.60	25.70	25.90	24.00	31.10	29.80	28.40	26.90	17.20	8.30
2	VMT	44.00	0.00	9.10	15.30	17.50	14.70	19.10	19.50	19.40	23.80	30.60	24.60	26.20	22.90	24.20	20.30	28.40	26.40	24.20	23.80	14.70	15.80
3	SJM	10.80	7.70	0.00	7.10	8.10	7.90	8.40	11.10	11.50	15.60	22.40	16.50	18.30	14.80	16.10	12.50	19.90	18.70	17.90	27.30	5.10	20.30
4	Chorrillos	12.70	14.10	7.30	0.00	6.40	11.70	9.30	15.40	16.20	22.20	26.80	23.30	22.60	2.70	9.40	12.20	17.90	17.40	14.10	36.20	8.40	19.70
5	Barranco	16.50	16.10	7.60	7.50	0.00	6.40	2.90	8.30	10.80	19.10	24.50	20.20	16.20	9.20	8.60	6.50	13.80	16.90	9.40	35.80	6.30	29.50
6	Surquillo	17.90	15.80	6.70	10.60	4.90	0.00	3.20	2.50	5.70	13.50	20.40	14.70	13.30	6.40	5.70	3.90	14.60	10.70	10.60	27.40	3.50	29.80
7	Miraflores	16.50	18.40	9.10	9.40	2.70	3.40	0.00	6.80	8.70	17.40	23.70	17.80	15.40	7.50	5.80	3.50	10.60	10.50	7.10	30.60	5.80	30.70
8	San Borja	21.60	19.90	11.20	9.90	8.20	2.70	6.30	0.00	5.50	10.50	17.50	10.50	9.50	4.20	5.40	4.30	16.90	9.90	14.10	25.10	4.20	33.60
9	San Luis	21.40	19.10	11.60	16.30	9.60	5.40	8.40	3.30	0.00	10.60	20.40	14.40	14.80	14.60	15.10	14.30	21.60	18.30	18.50	27.40	3.30	15.10
10	La Molina	26.20	23.90	16.10	20.50	20.20	13.60	17.50	10.70	10.60	0.00	11.30	8.70	12.50	12.60	14.50	13.80	23.10	18.20	20.50	15.10	11.50	34.40
11	Ate	33.00	30.70	23.70	29.40	23.70	19.80	23.40	19.10	22.50	11.30	0.00	10.00	12.30	18.40	21.40	21.00	28.90	26.20	24.70	25.80	19.80	48.10
12	Santa Anita	25.30	23.00	15.30	21.50	17.30	12.50	15.60	10.20	13.50	7.70	10.20	0.00	3.60	8.90	12.60	13.20	22.20	17.80	18.20	22.70	11.10	37.50
13	El Agustino	25.70	23.50	16.30	20.50	16.20	9.40	11.90	9.90	14.40	11.20	12.80	3.20	0.00	5.10	9.50	9.30	17.00	13.10	14.50	25.70	12.70	40.10
14	La Victoria	24.60	22.90	15.20	2.40	9.70	5.40	7.70	3.60	12.80	12.40	17.10	9.10	5.30	0.00	3.10	4.20	9.80	5.80	7.60	27.30	10.30	36.90
15	Lince	25.10	22.40	15.60	15.00	8.40	5.30	6.20	5.10	13.90	14.50	20.80	12.60	8.30	2.90	0.00	1.90	7.40	4.60	5.50	28.30	10.70	38.40
16	San Isidro	25.10	21.50	17.30	13.20	8.10	3.80	3.40	4.50	13.30	14.10	20.40	14.50	12.60	4.60	2.00	0.00	9.10	5.60	5.40	28.40	10.10	37.40
17	San Miguel	28.80	28.20	19.80	19.20	12.40	15.40	11.60	17.60	21.50	25.90	36.10	22.70	15.20	14.10	7.60	8.90	0.00	4.50	3.70	40.30	18.10	43.20
18	Pueblo Libre	28.90	26.30	19.60	17.60	11.40	13.50	10.70	9.50	18.60	18.30	22.50	15.10	11.50	6.40	4.40	6.30	4.40	0.00	2.80	34.90	15.80	41.30
19	Magdalena del Mar	27.20	25.70	17.20	14.50	9.10	11.20	8.40	11.50	18.10	20.30	24.60	17.50	13.20	7.80	5.00	5.60	3.70	2.40	0.00	35.10	14.80	40.20
20	Cieneguilla	27.30	22.50	35.50	36.50	32.60	27.60	32.20	25.70	36.40	14.70	25.70	23.40	28.30	27.50	28.70	31.70	37.80	35.20	35.30	0.00	26.30	26.70
21	Santiago de Surco	15.30	15.10	5.50	10.00	6.50	4.00	5.80	3.70	4.20	11.10	19.80	13.10	13.70	8.90	11.60	9.30	18.60	17.50	14.90	25.40	0.00	28.40
22	Lurin	8.40	14.30	20.10	19.80	25.40	25.60	28.20	28.70	13.80	31.40	40.90	34.60	34.60	33.60	34.20	32.00	34.70	36.50	33.50	20.70	23.50	0.00

(Fuente: Elaboración propia)

La Tabla 3 presenta la matriz de distancias correspondiente a la zona asignada al vehículo TM2. Cada elemento representa la distancia en kilómetros entre puntos de recolección y el punto de origen, incluyendo la planta de reciclaje como punto de origen y retorno.

TABLA 3
MATRIZ TM2 CONVERTIDA A KILÓMETROS

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Origen / Destino	Planta (VES)	Bellavista	Callao	SMP	Los Olivos	Ventanilla	Ancon	Puente Piedra	Carabayllo	Comas	SJL	Independencia	Rimac	Breña	Jesús María
1	Planta (VES)	0.00	38.60	37.80	44.20	43.90	57.40	72.70	53.10	53.90	47.90	37.40	37.10	32.70	31.90	27.80
2	Bellavista	34.20	0.00	3.20	12.70	16.40	23.10	41.90	27.60	28.30	22.80	21.90	12.10	15.60	7.70	8.60
3	Callao	38.70	3.20	0.00	10.30	15.50	20.00	41.30	32.80	26.40	21.00	23.20	14.90	18.10	9.80	11.70
4	SMP	44.50	10.90	11.80	0.00	4.10	17.40	34.60	15.50	15.80	10.80	23.80	8.10	12.30	14.20	18.00
5	Los Olivos	44.80	15.60	15.40	4.00	0.00	14.90	30.00	11.70	12.90	7.20	23.10	7.40	11.90	13.40	16.50
6	Ventanilla	57.80	22.60	19.80	16.70	20.80	0.00	20.30	11.00	20.10	23.60	41.40	24.00	42.60	28.10	31.30
7	Ancon	74.00	41.20	39.10	35.10	29.90	20.00	0.00	18.70	26.10	30.30	54.60	36.30	55.90	43.60	49.20
8	Puente Piedra	53.30	26.50	26.90	15.50	11.40	11.90	18.50	0.00	7.40	12.30	33.50	18.30	23.20	23.70	27.10
9	Carabayllo	55.60	27.30	27.10	15.90	12.10	21.50	26.40	7.40	0.00	4.90	33.00	18.70	34.00	23.40	27.30
10	Comas	51.60	21.40	21.80	10.80	7.50	21.00	30.20	11.80	4.90	0.00	28.20	14.00	18.90	18.60	22.50
11	SJL	36.40	21.50	22.80	25.60	23.90	40.10	50.60	33.60	25.60	22.60	0.00	19.00	18.20	16.50	16.30
12	Independencia	37.10	12.90	14.30	6.60	6.80	23.10	34.90	16.20	17.00	9.70	18.30	0.00	14.10	8.80	11.50
13	Rimac	33.50	15.20	17.60	12.50	13.60	38.80	50.30	21.70	29.80	17.10	17.10	12.70	0.00	8.40	4.60
14	Breña	30.70	6.90	9.50	15.60	16.70	26.60	42.40	20.80	24.90	18.80	15.90	7.70	7.00	0.00	4.30
15	Jesús María	27.50	8.50	12.20	18.60	20.90	30.50	45.30	26.90	27.70	21.70	17.90	10.80	4.90	4.50	0.00

(Fuente: Elaboración propia)

4. Aplicación de Índice y resolución con Solver, evaluación comparativa del antes y después

En nuestro modelo utilizamos la función INDICE porque nos permite extraer automáticamente el costo o la distancia entre dos puntos de la matriz. El INDICE toma como referencia la fila del punto actual y la columna del siguiente punto, según el orden que va probando Solver, de esta manera se calcula el costo de cada tramo de la ruta, y al sumar todos esos tramos obtenemos el costo total que Solver debe minimizar. Luego se aplicó el modelo de optimización utilizando el complemento Solver de Excel, con el objetivo de determinar la ruta óptima que minimice los costos operativos de los mismos. Para aplicar la solución mediante el Solver, primero se organizó en las celdas de la hoja de Excel toda la información necesaria para ser incorporada en la ventana de Parámetros del Solver, utilizando diferentes funciones. De esta forma, se registraron los valores correspondientes en los parámetros.

Para el TM1:

- Establecer Objetivo: “248.50” (Suma de a distancia Total).
- Para: Mín (Minimizar Distancia Total).
- Cambiando las celdas de las variables: (Puntos de Ruta Actual 1 - 22).
- Sujeto a las restricciones:
[Puntos de Ruta Actual 1 – 22] = Todos diferentes.
 (“Para asegurar que cada punto se visite solo una vez y se forme una ruta válida”).
- Método de resolución: Evolutionary (Que corresponde al algoritmo genético).

Para el TM2:

- Establecer Objetivo: “223.90” (Suma de a distancia Total).
- Para: Mín (Minimizar Distancia Total).
- Cambiando las celdas de las variables: (Puntos de Ruta Actual 1 - 15).
- Sujeto a las restricciones:
[Puntos de Ruta Actual 1 – 15] = Todos diferentes.
 (“Para asegurar que cada punto se visite solo una vez y se forme una ruta válida”).
- Método de resolución: Evolutionary (Que corresponde al algoritmo genético).

Con esto se le da a la opción Resolver de Solver. La validación del modelo permitió comprobar reducciones significativas en las distancias lo que también ayuda a los costos operativos, evidenciando la eficiencia del modelo propuesto para la optimización de rutas. Como se observa en la Tabla 5.

TABLA 4
RESOLUCIÓN CON SOLVER TM1
(DISTANCIA ACTUAL-DIS. CON SOLVER)

Puntos de ruta actual											
Ruta Actual	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Distancia	43.80	9.10	7.10	6.40	6.40	3.20	6.80	5.50	10.60	11.30	10.00
Distancia total											
248.50											

Puntos de ruta con Solver											
Ruta Optimizada	6	5	7	16	19	17	18	15	13	12	11
Distancia	4.90	2.90	3.50	5.40	3.70	4.50	4.40	8.30	3.20	10.20	11.30
Distancia total											
159.30											

Puntos de ruta actual											
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	1
3.60	5.10	3.10	1.90	9.10	4.50	2.80	35.10	26.30	28.40	8.40	

Puntos de ruta con Solver											
10	20	22	1	3	2	4	14	8	9	21	6
15.10	20.70	8.40	10.70	7.70	15.30	2.70	3.60	5.50	3.30	4.00	

(Fuente: Elaboración propia)

Aunque la planta no aparece como el primer número en la ruta optimizada, la operación siempre comienza en la planta. Solver no incluye la planta dentro de las variables porque es un nodo fijo que no debe ser ordenado. La matriz ya contiene las distancias desde y hacia la planta, por lo que la ruta real siempre es: “Planta - primer punto optimizado - ... - último punto”. En consecuencia, la distancia total del TM1 se redujo de 248.50 km a 159.30 km.

En La Tabla 2 y Tabla 3 se nos muestran las distancias reales de kilómetros del TM1 y TM2, entre la planta de reciclaje ubicada en Villa el Salvador y los distintos puntos de acopio. Este análisis con Solver permitió identificar puntos con recorridos redundantes o excesivos, lo que justificó la necesidad de optimizar la ruta y reducir la cantidad total de kilómetros.

Los valores fueron obtenidos ayudándonos de Google Earth y Google Maps, simulando su ruta de trabajo. La Tabla 4 nos muestra la ruta actual que recorría el TM1 y como se podría optimizar la ruta ahorrando los costos junto con los kilómetros recorridos. Del mismo modo, con el TM2 de la Tabla 5. Teniendo como consecuencia los resultados más eficientes utilizando la programación no lineal mediante Solver, pasando de 223.90 km a 194.90 km.

TABLA 5
RESOLUCIÓN CON SOLVER TM1
(DISTANCIA ACTUAL-DIS. CON SOLVER)

Puntos de ruta actual															
Ruta actual	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Distancia	38.60	3.20	10.30	4.10	14.90	20.30	18.70	7.40	4.90	28.20	19.00	14.10	8.40	4.30	27.50
Distancia total															
223.90															

Puntos de ruta actual															
Ruta actual	4	5	10	9	8	7	6	3	2	14	13	15	1	11	12
Distancia	4.10	7.20	4.90	7.40	18.50	20.00	19.80	3.20	7.70	7.00	4.60	27.50	37.40	19.00	6.60
Distancia total															
194.90															

(Fuente: Elaboración propia)

III. Unidades

La Tabla 6 muestra el desglose punto por punto de los costos actuales del camión TM1 y los valores optimizados obtenidos mediante Solver, permitiendo comparar cada ruta de manera individual. Este análisis detallado evidencia con precisión qué rutas presentaron variaciones significativas y cuáles se mantuvieron sin cambios. Los resultados revelan una reducción global del 35.65% en los costos operativos, lo que confirma que el modelo de optimización no solo disminuye el costo total, sino que también permite

identificar claramente dónde se generaron las mejoras dentro del sistema de rutas.

TABLA 6
COMPARACIÓN DE LAS DISTANCIAS TM1 (ACTUAL – SOLVER)

Nº	Dist. por Ruta	Dist. min. por Ruta	Diferencia	%
1	43.80	10.70	33.10	75.57%
2	9.10	15.30	-6.20	-68.13%
3	7.10	7.70	-0.60	-8.45%
4	6.40	2.70	3.70	57.81%
5	6.40	2.90	3.50	54.69%
6	3.20	4.90	-1.70	-53.13%
7	6.80	3.50	3.30	48.53%
8	5.50	5.50	0.00	0.00%
9	10.60	3.30	7.30	68.87%
10	11.30	15.10	-3.80	-33.63%
11	10.00	11.30	-1.30	-13.00%
12	3.60	10.20	-6.60	-183.33%
13	5.10	3.20	1.90	37.25%
14	3.10	3.60	-0.50	-16.13%
15	1.90	8.30	-6.40	-336.84%
16	9.10	5.40	3.70	40.66%
17	4.50	4.50	0.00	0.00%
18	2.80	4.40	-1.60	-57.14%
19	35.10	3.70	31.40	89.46%
20	26.30	20.70	5.60	21.29%
21	28.40	4.00	24.40	85.92%
22	8.40	8.40	0.00	0.00%

Dis. total actual	Dis. total con solver	Diferencia	%
248.50	159.30	89.20	35.90%

(Fuente: Elaboración propia)

El análisis comparativo entre las distancias actuales por ruta y las distancias mínimas obtenido mediante Solver evidencia una mejora significativa en la eficiencia operativa del sistema de recolección. De las 22 rutas evaluadas, 10 presentan reducciones de costo, reflejadas en porcentajes que oscilan desde 21.29% hasta 89.46%, teniendo por ejemplo San Isidro (40.66%), Miraflores (48.53%) y Barranco (54.69%) y Santiago de Surco (85.92%), las cuales representan los mayores ahorros relativos.

Por otro lado, 9 rutas muestran porcentajes negativos, con variaciones desde -8.45% hasta -336.84%, siendo esta última Lince, la cual es la que más se aleja del costo óptimo. Estos incrementos sugieren que, en escenarios optimizados, dichas rutas requieren mayor asignación de recursos, debido a las restricciones operativas que Solver prioriza para mantener el equilibrio global del sistema.

A nivel agregado, para TM1 la distancia total disminuye de 248.50 km a 159.30 km, lo que representa una reducción del 35.90% respecto al escenario actual. Este resultado confirma que la optimización aplicada genera un impacto altamente favorable, ayudando a redistribuir eficientemente los recursos y reducir la carga económica del proceso.

Por otro lado, la Tabla 7, presenta la comparación de costos por ruta del vehículo TM2, antes y después de aplicar

el modelo de optimización con Solver. Esta información permite analizar la eficiencia alcanzada en rutas de menor distancia típicas en el ruteo.

TABLA 7
COMPARACIÓN DE LAS DISTANCIAS TM2 (ACTUAL – SOLVER)

Nº	Dist. por Ruta	Dist. min. por Ruta	Diferencia	%
1	38.60	37.40	1.20	3.11%
2	3.20	7.70	-4.50	-140.63%
3	10.30	3.20	7.10	68.93%
4	4.10	4.10	0.00	0.00%
5	14.90	7.20	7.70	51.68%
6	20.30	19.80	0.50	2.46%
7	18.70	20.00	-1.30	-6.95%
8	7.40	18.50	-11.10	-150.00%
9	4.90	7.40	-2.50	-51.02%
10	28.20	4.90	23.30	82.62%
11	19.00	19.00	0.00	0.00%
12	14.10	6.60	7.50	53.19%
13	8.40	4.60	3.80	45.24%
14	4.30	7.00	-2.70	-62.79%
15	27.50	27.50	0.00	0.00%

Dis. total actual	Dis. total con solver	Diferencia	%
223.90	194.90	29.00	12.95%

(Fuente: Elaboración propia)

Los resultados de las distancias actuales frente a las distancias mínimas generadas por Solver revela cambios significativos en la eficiencia del esquema de operación. De las 15 rutas analizadas, 7 experimentan reducciones de kilómetros, expresadas en porcentajes positivos que varían entre 2.46% y 82.62%, siendo Comas esta última. También, esta Callao con (68.93%), Independencia (53.19%) y Los Olivos (51.68%), que concentran los mayores niveles de ahorro dentro del conjunto.

En contraste, 5 rutas presentan incrementos en sus recorridos, evidenciados mediante porcentajes negativos que se ubican entre -6.95% y -150%. Estos aumentos sugieren que, bajo el escenario optimizado, dichas rutas requieren una mayor inversión para sostener las condiciones operativas, ya sea por restricciones específicas o por la necesidad de equilibrar la distribución de recursos en el sistema.

De manera global, para TM2 la distancia total se reduce de 223.90 km a 194.90 km, equivalente a un ahorro del 12.95% respecto al esquema original. Este resultado demuestra que, aunque algunas rutas incrementan su recorrido, el modelo optimizado ofrece un beneficio neto y contribuye a una asignación más racional y eficiente de los recursos operativos.

Para mayores referencias estas serían las nuevas rutas de acopio para Traperos de Emaús.

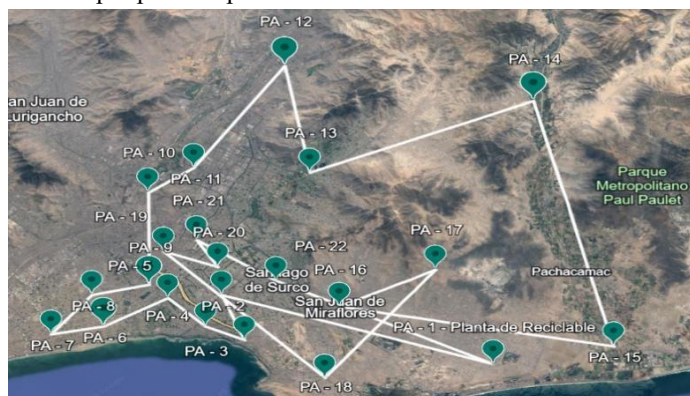


Fig. 3. Mapa Optimizado de puntos de acopio de papel reciclado y de planta de reciclaje del carro TM1 con Solver (Fuente: Google Earth)



Fig. 4. Mapa Optimizado de puntos de acopio de papel reciclado y de planta de reciclaje del carro TM2 con Solver (Fuente: Google Earth)

Los resultados obtenidos confirman que la aplicación de un modelo de programación no lineal resuelto mediante el método Evolutionary permitió optimizar significativamente las rutas de acopio de papel reciclado en Traperos de Emaús, reduciendo las distancias recorridas y los costos operativos totales. Estas mejoras coinciden con hallazgos de investigaciones que demuestran que el rediseño matemático de rutas reduce tiempos, emisiones y recursos logísticos en sistemas de recolección de residuos [13]. De este modo, la optimización aplicada no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también fortalece la sostenibilidad del proceso, alineándose con los principios de la economía circular.

Asimismo, la evidencia internacional muestra que la modernización de los sistemas de recolección es clave para enfrentar la variabilidad de la demanda, la dispersión de puntos y la presión ambiental, especialmente en sectores donde las rutas tradicionales generan costos elevados y recorridos redundantes. Dichos planteamientos coinciden con estudios que resaltan la importancia de integrar modelos de optimización avanzada y soluciones basadas en inteligencia artificial para mejorar la planificación de rutas y la asignación de recursos [5]. En ese sentido, el modelo propuesto permitió reorganizar la secuencia de visitas y

redistribuir los puntos de acopio, logrando una operación más racional y eficiente para la empresa.

Por otro lado, la reducción obtenida en las distancias totales, tendiendo un 34.04% de mejora en TM1 y 12.95% en TM2. Esto refleja un comportamiento compatible con análisis donde la aplicación de algoritmos evolutivos mejora la toma de decisiones en escenarios logísticos complejos, especialmente cuando existen múltiples restricciones y condiciones no lineales [14]. La capacidad del algoritmo Evolutionary para explorar soluciones más amplias que las técnicas lineales tradicionales resultó determinante para identificar rutas óptimas que no hubieran sido posibles bajo enfoques convencionales.

Finalmente, los resultados de este estudio reafirman la importancia de vincular la optimización matemática con la sostenibilidad operativa. Investigaciones recientes destacan que el rediseño de flujos logísticos en el sector de reciclaje contribuye a mejorar el desempeño ambiental y reducir la huella ecológica del transporte [1]. En consecuencia, la propuesta implementada no solo representa un beneficio económico para Traperos de Emaús, sino que también fortalece su contribución al aprovechamiento de residuos y a los objetivos de la economía circular en el país.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos especialmente a la profesora Rocío del Carmen León cuya guía y enseñanza fueron significativas para el desarrollo de este estudio. Su orientación constante y compromiso académico contribuyeron a la comprensión de los contenidos y a la culminación adecuada de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] A. Chidara, K. Cheng, and D. Galleary, "Engineering Innovations for Polyvinyl Chloride (PVC) Recycling: A Systematic Review of Advances, Challenges, and Future Directions in Circular Economy Integration," 2025, doi: 10.3390/machines13050362.
- [2] P. Xu, S. Rehman, M. Al-Greer, A. S. Burn, M. Short, and X. Cui, "Academic Editors: Yaocai Bai and High-Volume Battery Recycling: Technical Review of Challenges and Future Directions," 2025, doi: 10.3390/batteries11030094.
- [3] Á. Bányaí, I. Kaczmar, and T. Bányaí, "Green Micromobility-Based Last-Mile Logistics from Small-Scale Urban Food Producers," *Systems*, vol. 13, no. 9, Sep. 2025, doi: 10.3390/SYSTEMS13090785.
- [4] Y. Wang, "Development efficiency of green logistics in Guangdong province based on Super-SBM and GML index," *PLoS One*, vol. 20, no. 9 September, Sep. 2025, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0331893.
- [5] J. Ren, · Siti, and S. Salleh, "Green urban logistics path planning design based on physical network system in the context of artificial intelligence," *J Supercomput.*, vol. 80, pp. 9140–9161, 2024, doi: 10.1007/s11227-023-05796-x.
- [6] J. S. Yeomans and J. S. Yeomans, "Efficient generation of alternative perspectives in public environmental policy formulation: applying co-evolutionary simulation-optimization to municipal solid waste management," *CEJOR*, vol. 19, pp. 391–413, 2025, doi: 10.1007/s10100-011-0190-y.
- [7] Q. L. Han *et al.*, "Strengthening pollutant control and resource recovery can enhance sustainable waste incineration in China," *Commun Earth Environ*, vol. 6, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/S43247-025-02859-0.
- [8] Z.-A. Bin Ismail, "A critical study of the existing issues in circular economy practices during movement control order: can BIM fill the gap?", doi: 10.1108/ECAM-08-2021-0676.

- [9] H. Abyar, · Mohsen Nowrouzi, and H. Rezaei, "Efficient and Eco-Friendly Sawdust Adsorbent for Methylene Blue Removal: Adsorption Optimization, Kinetics, and Isotherm Modelling," *Int J Environ Res*, vol. 19, p. 128, 2025, doi: 10.1007/s41742-025-00790-y.
- [10] A. Tryhuba *et al.*, "Models for sustainable management of livestock waste based on neural network architectures," *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/S41598-025-13150-9.
- [11] W. S. Al-Rashed, "Assessing public perception and parametric analysis of municipal solid waste management solutions in Tabuk City, Saudi Arabia", doi: 10.1038/s41598-025-94525-w.
- [12] H. Alfredo López-Aguilar *et al.*, "Evaluation of Energy Potential in a Landfill Through the Integration of a Biogas-Solar Photovoltaic System," 2020, doi: 10.3390/urbansci9010017.
- [13] C. Hao, L. I. Libo, Q. Xuerui, and W. Wenxian, "Research on optimization of transportation routes for infectious medical waste," *PLoS One*, vol. 20, no. 9, p. e0330996, 2025, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0330996.
- [14] Ó. Oliveira, E. Costa Silva, D. Gamboa, and S. Talal Alharbi, "Academic Editors: Paolo Bellavista, Multi-Objective Evolutionary Algorithms in Waste Disposal Systems: A Comprehensive Review of Applications, Case Studies, and Future Directions," 2025, doi: 10.3390/computers14080316.
- [15] S. Nski *et al.*, "Academic Editors: Grzegorz Optimization and Trends in EV Charging Infrastructure: A PCA-Based Systematic Review," 2025, doi: 10.3390/wevj16070345.
- [16] F. A. Ghansah and W. Lu, "Major opportunities of digital twins for smart buildings: a scientometric and content analysis", doi: 10.1108/SASBE-09-2022-0192.
- [17] M.-L. Tseng, C.-C. Chen, K.-J. Wu, and R. Tan, "Eco-efficient sustainable service supply chain management hierarchical model based on qualitative information and quantitative data," *An International Journal*, vol. 31, no. 4, pp. 961–984, 2020, doi: 10.1108/MEQ-08-2019-0179.
- [18] M. Kahn, M. Sangiorgio, and L. Rosa, "Potential of wastewater reuse to alleviate water scarcity under future warming scenarios," *Environmental Research Letters*, vol. 20, no. 3, Mar. 2025, doi: 10.1088/1748-9326/ADB31D.
- [19] Y. Li, F. Zambrano, Y. Wang, and R. Marquez, "How China's Foreign Waste Ban Will Reshape the U.S. Recycling Supply Chain: Economic and Environmental Considerations towards a Circular Economy Oriented Paper Recycling Industry," *Bioresources*, vol. 17, no. 2, pp. 3178–3201, 2022, doi: 10.15376/BIORES.17.2.3178-3201.
- [20] K. Ramalingam *et al.*, "An assessment of optimizing biofuel yield percentage using K-fold integrated machine learning models for a sustainable future," 2025, doi: 10.1371/journal.pone.0328880.
- [21] "Optimisation of Enzyme Lignin Degradation Using Response Surface Methodology for Sustainable Lignocellulosic By-Products Management - ProQuest." Accessed: Nov. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.proquest.com/docview/3265814500/fulltextPDF/2181E7DD2E514DA8PQ/1?accountid=36937&sourcetype=Scholarly%20Journals>
- [22] S. Hodge, P. Barrett, and P. Kurian, "The circular economy in Aotearoa New Zealand: a critical evaluation of policy and its current prospects," 2025, doi: 10.1080/1177083X.2025.2504489.
- [24] E. N. Gökalo and U. Sakaryao, "Multi-sensor data fusion and nonlinear programming-based path prediction for escaping from engagement in combat," *Archives of Control Sciences*, vol. 34, no. 2, pp. 247–269, 2024, doi: 10.24425/acs.2024.149660.
- [25] P. Ochoa, C. Peraza, P. Melin, O. Castillo, and Z. W. Geem, "Type-3 Fuzzy Dynamic Adaptation of the Crossover Parameter in Differential Evolution for the Optimal Design of Type-3 Fuzzy Controllers for the Inverted Pendulum," *Machines*, vol. 13, no. 6, Jun. 2025, doi: 10.3390/MACHINES13060450