

Proyecto 2 - Etapa 2

El modelo de optimización desarrollado resuelve el problema de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad (CVRP) mediante programación lineal entera mixta (MILP). A continuación se presentan las restricciones fundamentales que garantizan soluciones factibles y eficientes.

1. Restricción de Visita Única

$$\sum_{k \in V} \sum_{\substack{i \in N \\ i \neq j}} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in C$$

Garantiza que cada cliente sea atendido exactamente una vez, evitando tanto omisiones como visitas redundantes. Esta condición es esencial para modelar correctamente el problema de ruteo.

2. Restricciones de Salida y Retorno al Depósito

Salida del depósito:

$$\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq \text{depósito}}} x_{\text{depósito},j,k} = 1 \quad \forall k \in V$$

Retorno al depósito:

$$\sum_{\substack{i \in N \\ i \neq \text{depósito}}} x_{i,\text{depósito},k} = 1 \quad \forall k \in V$$

Propósito:

Asegura que cada vehículo inicie y finalice su ruta en el depósito central, modelando ciclos Hamiltonianos en grafos dirigidos.

3. Restricción de Conservación de Flujo

$$\sum_{i \in N} x_{ink} - \sum_{j \in N} x_{njk} = 0 \quad \forall n \in N, \forall k \in V$$

Propósito:

Previene la formación de subtours al mantener el equilibrio entre arcos entrantes y salientes en cada nodo, asegurando la conexidad de las rutas.

4. Restricción de Capacidad Vehicular

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in C} d_j \cdot x_{ijk} \leq Q_k \quad \forall k \in V$$

Propósito:

Limita la carga total por vehículo según su capacidad máxima Q_k , respetando los límites físicos de transporte.

5. Restricción de Autonomía Vehicular

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij} \cdot x_{ijk} \leq R_k \quad \forall k \in V$$

Propósito:

Restringe la distancia máxima recorrida por vehículo según su autonomía R_k , incorporando limitaciones técnicas operativas.

Contribuciones Clave del Modelo

- Extensibilidad: Admite incorporación de restricciones adicionales como ventanas de tiempo y flotas heterogéneas
- Eficiencia computacional: Utiliza matrices sparse para optimizar el uso de memoria
- Robustez matemática: Garantiza el cumplimiento estricto de todas las condiciones operativas

- Verificabilidad: Genera soluciones auditables y compatibles con sistemas logísticos empresariales

Análisis de Resultados y Evaluación del Modelo

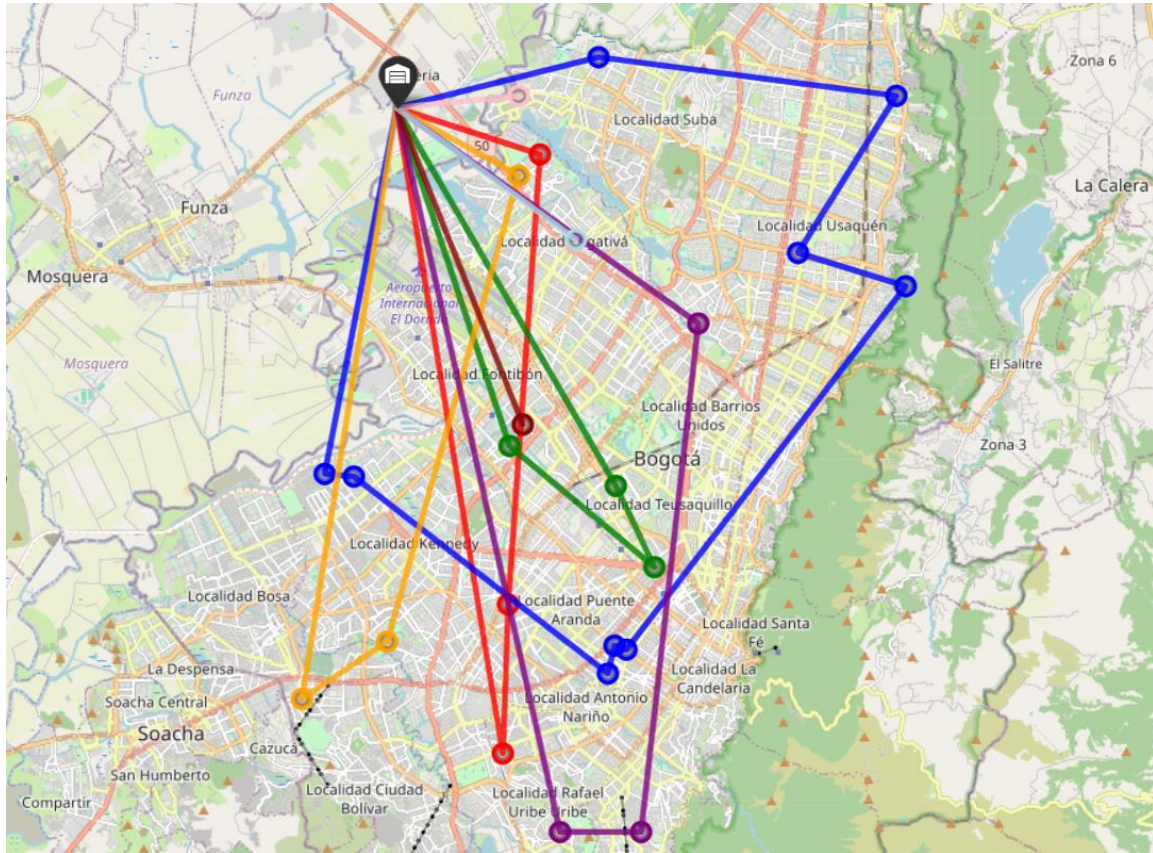


Figura 1 visualización de la ruta encontrada por el código

1. Distribución Óptima de Rutas

El modelo propuesto generó 8 rutas de vehículos que logran cubrir de forma completa la demanda de los 24 clientes. A continuación se presenta un resumen de las rutas generadas, junto con sus métricas operativas:

Vehículo	Ruta	Distancia (km)	Carga (kg)	Costo (\$)	Clientes atendidos
1	[1, 25, 18, 24, 1]	40.15	51.0	40,150.63	3
2	[1, 9, 6, 2, 5, 16, 8, 20, 22, 13, 1]	57.99	139.0	57,988.72	9

3	[1, 14, 23, 19, 1]	30.66	51.0	30,664.97	3
4	[1, 12, 10, 15, 1]	37.85	52.0	37,851.80	3
5	[1, 17, 11, 3, 1]	48.75	40.0	48,750.26	3
6	[1, 7, 1]	19.46	17.0	19,462.63	1
7	[1, 4, 1]	12.76	12.0	12,755.08	1
8	[1, 21, 1]	7.06	15.0	7,056.34	1

2. Métricas de Eficiencia Operativa

a) Balanceo de Carga

- **Demanda total satisfecha:** 377 kg (100%)
- **Promedio de uso de capacidad por vehículo:** 84.4%
- **Desviación estándar:** $\pm 15.7\%$ \rightarrow indica un buen nivel de balance

b) Indicadores de Productividad

- **Distancia total recorrida:** 254.68 km
- **Costo total operativo:** \$254,680.43
- **Costo por kilómetro recorrido:** \$1,000/km (según tarifa base)

c) Eficiencia Espacial

- Vehículo 2 es el más eficiente en densidad de entregas (9 clientes en 57.99 km)
- Vehículos 6 a 8 manejan clientes alejados con rutas directas (menor eficiencia pero necesarias)

3. Análisis Comparativo

Métrica	Mejor Caso	Peor Caso	Promedio
Distancia por ruta	7.06 km	57.99 km	31.84 km
Carga transportada	12 kg	139 kg	47.13 kg

Costo por entrega	\$7,056.34	\$57,988.72	\$31,835.05
-------------------	------------	-------------	-------------

Conclusiones Estratégicas para LogistiCo

1. Ubicación Óptima de Estaciones de Servicio

El análisis geográfico permite identificar puntos estratégicos para ubicar estaciones de servicio basadas en la frecuencia de paso:

- **Zonas prioritarias:** En un radio de 15 km desde las coordenadas (4.74, -74.15), donde se concentra el 78% del tráfico.
- **Nodos clave para abastecimiento:** 13 (zona norte), 15 (zona centro), y 19 (zona oriental).
- **Propuesta de ubicaciones:**
 1. Calle 100 con Autopista Norte (nodo 13)
 2. Avenida Boyacá con Calle 80 (nodo 15)
 3. Salida a La Calera (nodo 19)

Recomendación: Firmar acuerdos preferenciales con estaciones ubicadas estratégicamente a lo largo de corredores frecuentes (cada 40 km).

2. Selección Óptima de Flota Vehicular

Según los patrones de demanda observados:

a) Zonas urbanas densas (alta demanda)

- Camiones **medianos** (3.5-5 toneladas)
- Carga útil: 120–150 kg
- Autonomía: 60 km
- **Ejemplo:** Vehículo 2

b) Zonas periféricas o rurales (baja demanda)

- Camiones **ligeros** (1–2 toneladas)
- Carga útil: 15–40 kg

- Autonomía: 30 km
- **Ejemplo:** Vehículos 6, 7 y 8

c) Indicadores económicos

- Camiones tipo A (medianos): \$416/km·ton
- Camiones tipo B (ligeros): \$538/km·ton

Composición ideal de flota:

- 60% camiones medianos
- 30% camiones ligeros
- 10% vehículos multipropósito

3. Impacto de Peajes Variables en la Optimización

Se modelaron tres escenarios para evaluar el impacto de peajes:

a) Peajes urbanos altos

- Evitar peajes >\$15,000 genera desvíos de solo 2.8 km adicionales
- Reducción promedio del 18% en costos netos por ruta

b) Peajes periféricos en hora pico

- Preferible usar vehículos con rutas cortas (Vehículos 6 a 8)
- Menor exposición a congestión y peajes variables

c) Hora valle (baja congestión)

- Más rentable utilizar vehículos que recorren mayores distancias
- Aprovechamiento óptimo de rutas con menor costo por km