

## **Análisis de la Solución Obtenida: Caso Base**

### **5.1 Cumplimiento del Objetivo e Implementación Técnica**

En esta fase del proyecto, nuestro objetivo primordial fue la implementación en Pyomo del modelo de optimización diseñado para abordar la compleja problemática de asignación de inventario y planificación de rutas de transporte en el entorno urbano de Bogotá. Nos complace reportar que hemos traducido exitosamente la formulación matemática a código ejecutable. Esta implementación es fundamental, ya que nos permite pasar del diseño teórico a la aplicación práctica, sentando las bases para una herramienta que busca minimizar los costos operativos y de transporte de LogistiCo, al tiempo que asegura la viabilidad de las entregas dentro de sus restricciones operativas.

Un aspecto crucial de nuestra implementación fue la integración de datos geográficos realistas obtenidos a través de la API de Openrouteservice. Esta decisión técnica es coherente con la necesidad de modelar fielmente el contexto de Bogotá, donde la congestión y las características viales impactan significativamente las distancias y los tiempos de viaje, haciendo que el uso de mediciones euclidianas sea inadecuado para obtener resultados aplicables.

### **5.2 Contexto del Problema y Desafíos Operativos en la Implementación**

La traducción del modelo matemático a un código funcional en Pyomo implicó un trabajo detallado en la definición de los conjuntos, parámetros y variables del problema. Cada restricción formulada, incluyendo la capacidad limitada de los centros de distribución, las restricciones de capacidad y autonomía de los vehículos, y las complejidades de la estructura de la ruta (como la eliminación de subtours), fue cuidadosamente codificada para ser procesada por un solver. La integración de los datos de distancia y duración de la API, si bien aporta realismo, también introdujo una dependencia externa y un paso de pre-procesamiento que debe ser gestionado de forma robusta.

El desafío más significativo que encontramos en esta etapa fue el rendimiento computacional. Para el caso base considerado, con 1 depot, 24 clientes y 8 vehículos, el solver HiGHS, incluso con un límite de tiempo extendido de 900 segundos, no logró alcanzar la solución óptima. Obtuvimos una solución *factible*, pero con un gap de optimalidad superior al 55%. Esta situación es crítica desde una perspectiva operativa, ya que un tiempo de resolución prolongado y la ausencia de garantía de optimalidad pueden limitar la aplicabilidad de la herramienta en escenarios dinámicos o de mayor escala que LogistiCo podría enfrentar en el día a día en Bogotá. La naturaleza combinatoria del problema de ruteo, sumada a las restricciones y al contexto geográfico real, incrementan la complejidad del cálculo.

## Análisis Detallado de la Solución Factible Obtenida

La solución factible que arrojó nuestra implementación presenta un costo total aproximado de 3.86 millones de COP. Al examinar los detalles por vehículo, podemos inferir lo siguiente sobre la estrategia de ruteo propuesta:

- **Utilización de la Flota:** Se utilizaron 7 de los 8 vehículos disponibles. El vehículo V6 no fue asignado a ninguna ruta, lo cual es consistente con la lógica del modelo si la demanda total puede ser cubierta eficientemente por el resto de la flota sin violar sus capacidades o rangos.
- **Carga y Capacidad Vehicular:** Los vehículos asignados inician sus rutas desde el único depot (D1) con una carga que corresponde a la suma de las demandas de los clientes que visitarán. Observamos que ningún vehículo excede su capacidad máxima, confirmando que esta restricción operativa clave de LogistiCo se cumple en la solución. La suma de las cargas iniciales de los vehículos en ruta representa la demanda total de los 24 clientes, lo que valida la asignación completa.
- **Estructura y Secuencia de Rutas:** Las rutas generadas inician y terminan en el depot D1. Por ejemplo, el vehículo V2 sigue la secuencia D1 -> C3 -> C18 -> C15 -> C5 -> D1. La longitud y la complejidad de las rutas varían, lo que es esperable dada la distribución espacial de los clientes y la búsqueda de eficiencia en el ruteo.
- **Atención a Clientes y Demandas:** La solución atiende a todos los clientes requeridos. La columna 'ClientsServed' en el archivo de verificación cuantifica los clientes visitados por cada vehículo, y 'DemandsSatisfied' presenta las demandas específicas atendidas en el orden secuencial de la ruta. La coherencia entre la suma de estas demandas por vehículo y la carga inicial reportada valida la extracción y el cumplimiento de la asignación de demanda.
- **Métricas de Distancia y Tiempo:** Las distancias totales recorridas por los vehículos varían, reflejando la extensión geográfica de las rutas asignadas, calculadas precisamente por la API de Openrouteservice. El tiempo total asociado a cada ruta, también obtenido de la API y reportado en minutos en nuestro archivo de verificación, es una métrica fundamental en el contexto de Bogotá. Observamos que los tiempos reportados, si bien variables, parecen razonables para las distancias y la complejidad de las rutas urbanas (por ejemplo, más de 3.7 horas para la ruta de V7).
- **Restricciones de Rango:** La solución factible encontrada respeta, en principio, la restricción de rango de los vehículos, aunque el alto gap de optimalidad nos lleva a considerar la posibilidad de que, al no alcanzar el óptimo, la solución podría

presentar ligeras holguras o ser susceptible a mejoras que optimicen aún más el uso del rango disponible. Deberemos monitorear esta restricción en futuros casos para asegurar que el solver la maneja adecuadamente bajo diferentes condiciones.

- **Costo de Combustible:** El costo total de combustible para cada ruta, calculado directamente a partir de la distancia y el costo unitario, es un componente significativo del costo total operativo minimizado por el modelo.