

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**Optimización de rutas en una empresa de recojo de residuos sólidos
en el distrito de los Olivos**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Industrial, que presenta el bachiller:

José Alberto Taquía Valdivia

ASESOR: Miguel Hermógenes Mejía Puente

Lima, mayo de 2013

RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo implementar el método más adecuado de optimización de rutas para una empresa de transporte de residuos sólidos con el fin de mejorar su rentabilidad, debido a que dentro del sector de recolección de residuos, el tema de optimización lineal de rutas no ha sido explorado ni sustentado de manera contundente en el panorama nacional, como así lo demuestra el análisis de la empresa. Esto contrasta con el hecho de que la distribución de rutas es la operación de ingresos más significativos para las empresas de este sector.

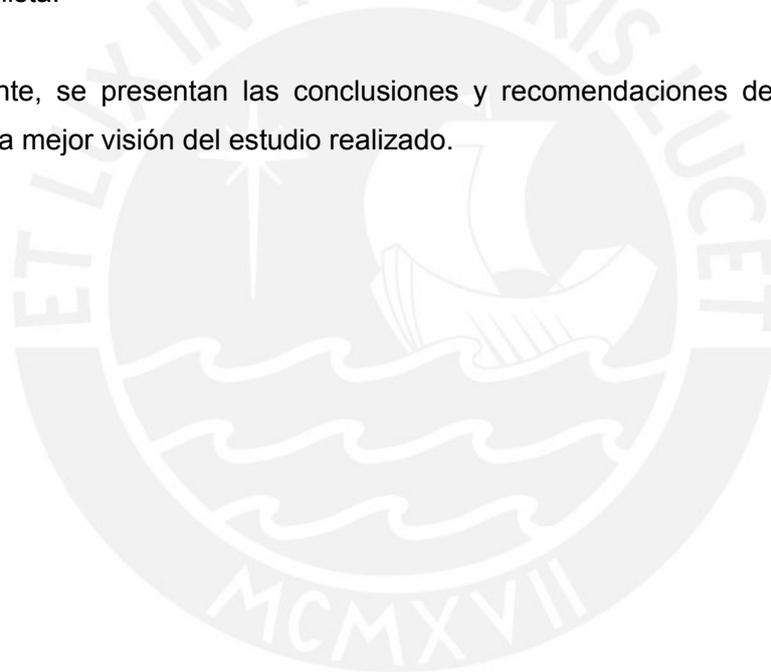
En el marco teórico se analizan los métodos de optimización de rutas mediante teoremas y aplicaciones prácticas, mencionando los fundamentos, restricciones y algoritmos adecuados para el caso de la empresa en estudio. Se encuentra así que la solución propuesta combinará por el lado del microruteo la fórmula para hallar el número de vehículos necesarios para recoger los residuos de todo el distrito, mientras que para el macroruteo se ajustará el método del Agente Viajero (TSP) al caso. De esta manera se adecúa una solución relevante para el problema de la empresa.

En la descripción y diagnóstico, primero se detallan las características principales de la empresa y sus distintas áreas, luego se analiza su estado actual con énfasis en la distribución de rutas. Así, se fundamenta la necesidad de aplicar el método de optimización de rutas, y se propone el enfoque a desarrollar en la solución.

La solución propuesta desarrolla la optimización de rutas en dos partes: la sectorización de rutas y el modelo de optimización. En la sectorización, se define el detalle del número de rutas necesarias en el distrito, así como los recursos necesarios para ejecutarlas, mediante la maximización de la capacidad de flota disponible. Se logra reducir en 2 el número de vehículos necesarios diariamente para recoger los residuos sólidos del distrito. En el modelo de optimización, se propone una solución adecuada al modelo, mediante la teoría antes revisada y adaptándolo empíricamente a la práctica. De esa manera se reduce el tiempo total de viajes en 20% como base.

En la evaluación económica, se analizan los ingresos y egresos monetarios del proyecto, además de la rentabilidad económica en un horizonte de 10 años. Como resultado, el proyecto obtiene un VPN de más de 2 millones de soles y una TIR de 75.1%. También se genera un análisis de sensibilidad, para conocer las variables más propensas a variaciones, en el cual se obtiene que el riesgo de penalización es el que más afecta al proyecto en cuanto a la generación de una rentabilidad considerable. Sin embargo, el proyecto genera beneficios desde varias aristas, lo cual permite que los escenarios, aun cuando se reduzca el beneficio respecto al escenario más atractivo, sigan teniendo un tiempo de recupero menor a diez años y generando interés al inversionista.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones del documento para tener una mejor visión del estudio realizado.





A mis padres Betty y Luis por enseñarme el valor del esfuerzo y a mi hermano Manuel por su apoyo incondicional.

TEMA DE TESIS

PARA OPTAR : Título de Ingeniero Industrial

ALUMNO : **JOSÉ ALBERTO TAQUÍA VALDIVIA**

CÓDIGO : 2006.0296.6

PROPUESTO POR : Miguel H. Mejía Puente

ASESOR : Miguel H. Mejía Puente

TEMA : OPTIMIZACIÓN DE RUTAS EN UNA EMPRESA DE RECOJO DE RESIDUOS SÓLIDOS EN EL DISTRITO DE LOS OLIVOS

Nº TEMA :

FECHA : San Miguel, 23 de setiembre de 2012

JUSTIFICACIÓN:

En los últimos años, las organizaciones sitúan a la gestión logística como elemento clave dentro de sus estrategias. Sin embargo, no todas abordan este problema de manera adecuada. Este punto se hace más relevante si se tiene en cuenta que la flota automotriz actual de Lima Metropolitana supera a la necesaria, lo que congestiona la circulación de las vías principales o troncales en los más de 8,000 km de vías asfaltadas, suficientes para la circulación de la población¹. Además existe un parque automotriz en aumento continuo: sólo el transporte público ha crecido en 72% entre los años 2006-2010². Esto quiere decir que el tráfico multiplica los gastos de una distribución de rutas no optimizada, debido a costos del transporte y tiempo, y estos se hacen mayores cada año. Este gasto puede ser reducido mediante la optimización de rutas. Si se tiene en cuenta que en cualquier empresa, el transporte corresponde a entre el 10% y el 20% del costo final de los bienes de la empresa³, siendo aún mayor

¹ Plan de Gobierno Fuerza Social 2010

² Anuario Estadístico 2010 Ministerio de Transporte y Comunicaciones

³ Toth, P., Vigo, D.: An Overview of Vehicle Routing Problems (2000)

en una empresa cuyo servicio principal es el mismo transporte, este tema se vuelve crítico en el cálculo de la rentabilidad de la empresa.

Es por ello que se aprovecha esta oportunidad de mejora para desarrollar un sistema óptimo para una empresa de recolección, transporte y disposición final de residuos sólidos que opera en cinco distritos de Lima: Los Olivos, Santa Anita, Lince, Pueblo Libre e Independencia, además de la Provincia Constitucional del Callao.

La empresa elegida cuenta con contratos de exclusividad con los distritos antes mencionados. Para cumplir con los contratos, tiene una flota de 50 vehículos de transporte propios, y aproximadamente 10 subcontratados. Existen alrededor de 270 trabajadores vinculados a la empresa, 20 en el área administrativa y los demás en el área de recolección de residuos sólidos.

La división de rutas es designada mediante contrato, y usualmente se rigen a patrones del municipio, ordenados sin una optimización definida. La empresa procura distribuir las zonas en áreas proporcionales, sin embargo no existe una manera justificada operativamente que explique la designación de rutas y que asegure la ruta óptima. Por ello se busca realizar este estudio para así mejorar eficientemente la designación más importante de los recursos de la empresa, asegurando su óptima operación y el aprovechamiento de sus recursos y capacidades, respecto a su actividad más importante: el transporte.

OBJETIVO GENERAL:

Analizar la situación actual de las rutas de transporte para la empresa en los distritos en los que opera, realizar un diagnóstico general, escoger las zonas a trabajar, las rutas a optimizarse y proponer soluciones adecuadas con el objetivo de aumentar la efectividad en el transporte de los residuos sólidos y la rentabilidad económica en la empresa.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Obtener la información necesaria sobre el alcance territorial de la empresa en los distritos donde opera, y sobre las restricciones a tener.
- Conocer el marco teórico necesario sobre el tema de sectorización y optimización de rutas.
- Desarrollar una fundamentación teórica sostenible sobre el tema de sectorización, para poder asignar las áreas de alcance.
- Desarrollar una fundamentación teórica sostenible sobre las rutas elegidas para el desarrollo del modelo.
- Utilizar los conocimientos de Ingeniería Industrial para elaborar las propuestas, y ajustarlas a la realidad.
- Cuantificar económicamente la implementación de la ruta, de tal manera que demuestren su necesidad a la empresa y la rentabilidad de esta, en el largo plazo.

PUNTOS A TRATAR:

a. **Marco teórico**

Se presenta el marco teórico de la optimización de rutas: primero una introducción a la Programación Lineal, para conocer las características principales necesarias del modelo a realizar, y luego el algoritmo de Optimización de Rutas propuesto.

b. **Análisis y diagnóstico de la situación actual de la empresa**

Se mostrarán los antecedentes, la descripción de la empresa explicando a qué se dedica, su misión y visión, su estructura organizacional y sus capacidades. Se analizarán las rutas y la fundamentación de su designación, señalando si son las pertinentes. Así mismo se describirá el proceso de transporte que se lleva a cabo actualmente. Se describirán los tipos de vehículos que se utilizan, los horarios en los que operan por distrito, y el número de trabajadores por vehículo.

c. **Propuesta de mejora para la optimización de rutas en la empresa**

Se desarrolla la propuesta de mejora en la empresa. Primero, se utilizan premisas y consideraciones para limitar la sectorización de la mejora y la sectorización.

En segundo lugar, se realiza la ejecución del modelo de rutas para encontrar la ruta óptima para la selección. Asimismo, se establecen características previas a la implementación.

d. **Evaluación Económica/ Financiera**

Se evalúa si la propuesta de mejora planteada tiene un impacto económico en la empresa, si la beneficiará, si aumentará su productividad y efectividad. Esto será evaluado con indicadores financieros.

e. **Conclusiones y Recomendaciones**

Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones

ASESOR

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. Investigación de operaciones.....	3
1.1.1. Problema de optimización	3
1.1.2. Programación matemática.....	4
1.1.3. Modelo de programación matemática.....	5
1.1.4. Formulación del problema de programación lineal.....	6
1.2. Algoritmos de optimización de rutas	7
1.2.1. Clientes	7
1.2.2. Depósitos	8
1.2.3. Vehículos	8
1.2.4. Formulación matemática	8
a. El problema del agente viajero (TSP).....	9
1.3. Aplicación al modelo de optimización de transporte de residuos sólidos.....	10
1.3.1. Optimización de rutas en México	11
1.3.2. Uso e implementación de métodos meta heurísticos de tipo tabú para resolución de problemas de optimización duros	14
1.3.3. Resumen de solución propuesta.....	15
CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE LA EMPRESA	17
2.1. Aspectos Generales.....	17
2.2. Administración.....	21
2.3. Operaciones	25
2.4. Recursos Humanos.....	28

2.5. Maestranza	28
2.6. Rutas	29
CAPÍTULO 3. SOLUCIÓN PROPUESTA	32
3.1 Sectorización de Rutas	32
3.2 Modelo de Optimización de Rutas	34
3.3 Beneficios cualitativos y amenazas	64
3.3.1 Beneficios cualitativos	64
3.3.2 Amenazas internas y externas	64
CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN ECONÓMICA	66
4.1 Análisis de la operación	66
4.1.1 Ingresos	66
a. Ahorro en capacidad ociosa	66
b. Ahorro en mano de obra	67
c. Ahorro en gasolina por Optimización de Ruta	68
4.1.2 Egresos	70
a. Costos por elaboración de la propuesta	70
b. Costos de penalización por incumplimiento de contrato	71
c. Costos de indemnización por despido	71
4.2 Flujos de caja del proyecto	72
4.2.1 Flujo de caja económico del proyecto	72
4.2.2 Financiamiento del proyecto	74
4.3 Evaluación financiera	74
4.3.1 Costo ponderado de capital (WACC)	74
4.3.2 Evaluación económica	76
4.4 Análisis de sensibilidad	77
4.4.1 Penalización de la Municipalidad	77
4.4.2 Concepto por alquiler de vehículos	78

4.4.3	Reducción de las rutas optimizadas	79
4.4.4	Análisis de variables críticas	79
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		81
5.1	Conclusiones	81
5.2	Recomendaciones.....	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		83



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Horarios de rutas por distrito	19
Tabla 2 – Distancias y tiempo promedio de recorrido por ruta	21
Tabla 3 - Detalle de campos del reporte diario	24
Tabla 4 – Cargas Promedio del año 2012 al mes de Septiembre	29
Tabla 5 – Distribución de toneladas por área por ruta para el 2012 al mes de Septiembre	30
Tabla 6 – Nueva distribución de toneladas por ruta propuesta	33
Tabla 7 – Distribución de las áreas de las nuevas rutas respecto a las antiguas.....	34
Tabla 8 – Relación de tiempos estimados de recorrido de nuevas rutas	60
Tabla 9 - Número de arcos por ruta	60
Tabla 10 – Diferencia entre distancia total del modelo y distancia ajustada	61
Tabla 11 – Tiempos estimados de los modelos	63
Tabla 12 - Ingresos por alquiler de vehículos con capacidad ociosa	67
Tabla 13 – Ahorro por reducción de mano de obra	68
Tabla 14 - Tiempos de recorrido de rutas	69
Tabla 15 - Ingresos por reducción de gastos de gasolina	69
Tabla 16 – Costos de personal asignado al proyecto	70
Tabla 17 - Costos de indemnización por despido	71
Tabla 18 - Flujo de caja económico del proyecto	73
Tabla 19 - Resultados del análisis financiero	76
Tabla 20 - Sensibilidad de variable penalización de la Municipalidad.....	78
Tabla 21 - Sensibilidad de variable concepto por alquiler de vehículos.....	79
Tabla 22 - Sensibilidad de variable reducción de las rutas optimizadas	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Organigrama de la empresa	18
Figura 2 - Mapa de Los Olivos.....	20
Figura 3 - Mapa de Los Olivos dividido en rutas de recojo.....	20
Figura 4 – Proceso de creación de reporte manual mediante información Web de GPS	23
Figura 5 – Proceso actual de ejecución de rutas	27
Figura 6 – Nueva distribución de rutas.....	36
Figura 7 - Detalle de recorrido de ruta 1.....	42
Figura 8 – Detalle de recorrido de ruta 2.....	43
Figura 9 - Detalle de recorrido de ruta 3.....	44
Figura 10 - Detalle de recorrido de ruta 4	45
Figura 11 - Detalle de recorrido de ruta 5	46
Figura 12 - Detalle de recorrido de ruta 6	47
Figura 13 – Detalle de recorrido de ruta 7	48
Figura 14 - Detalle de recorrido de ruta 8	49
Figura 15 - Detalle de recorrido de ruta 9	50
Figura 16 – Detalle de recorrido de ruta 10.....	51
Figura 17 - Detalle de recorrido de ruta 11	52
Figura 18 - Detalle de recorrido de ruta 12	53
Figura 19 – Detalle de recorrido de ruta 13.....	54
Figura 20 – Detalle de recorrido de ruta 14.....	55
Figura 21– Detalle de recorrido de ruta 15.....	56
Figura 22 – Detalle de recorrido de ruta 16.....	57
Figura 23 - Detalle de recorrido de ruta 17	58
Figura 24 – Detalle de recorrido de ruta 18.....	59



INTRODUCCIÓN

Para una empresa de recolección de residuos sólidos, la distribución de rutas es elemento fundamental dentro de su visión operativa y estratégica. Sin embargo, no es tratada de esta manera, y en cambio la generación de rutas se convierte en un trabajo totalmente empírico y sin tomar en cuenta principios teórico, que sí han sido desarrollados en otros sectores, más avanzados dentro del contexto nacional.

Es importante considerar las cifras: en cualquier empresa, el transporte corresponde a entre el 10% y el 20% del costo final de los bienes⁴, siendo el porcentaje aún mayor en una empresa cuyo servicio principal es el mismo transporte. Este punto se hace más relevante si se tiene en cuenta que la flota automotriz actual de Lima Metropolitana supera a la necesaria, lo que congestiona la circulación de las vías principales o troncales en los más de 8,000km de vías asfaltadas, suficientes para la circulación de la población⁵. Además existe un parque automotriz en aumento continuo: sólo el transporte público ha crecido en 72% entre los años 2006-2010⁶.

Es por ello que se aprovecha esta oportunidad de mejora para desarrollar un sistema óptimo para una empresa de recolección, transporte y disposición final de residuos sólidos que opera en cinco distritos de Lima: Los Olivos, Santa Anita, Lince, Pueblo Libre e Independencia, además de la Provincia Constitucional del Callao. La idea de generar un modelo es de mejorar de la rentabilidad de la empresa, pero también generar una base que pueda mitigar los efectos del desarrollo del tráfico urbano en los próximos.

La siguiente tesis tiene como objetivo implementar el método de optimización de rutas y desarrollar los objetivos mencionados. El documento incluye un análisis teórico de las mejores prácticas a nivel mundial de optimización de rutas y específicamente de distribución de residuos sólidos. Luego se realizará un análisis de la empresa enfocado en las operaciones y las distribuciones de rutas. A partir de la información general y del

⁴ Toth, P., Vigo, D.: An Overview of Vehicle Routing Problems (2000)

⁵ Plan de Gobierno Fuerza Social 2010

⁶ Anuario Estadístico 2010 Ministerio de Transporte y Comunicaciones

análisis mencionado, se presentará un modelo adaptado a la práctica, enfocado en el área de Operaciones de la empresa. Se presentará la información necesaria para poder analizar los resultados así como los indicadores financieros asociados al proyecto. Finalmente, se expondrán las conclusiones y recomendaciones para considerar en la futura implementación de la propuesta.



CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1. Investigación de operaciones

La Investigación de Operaciones parte del estudio y despliegue de métodos científicos para usar eficazmente los recursos. Tales métodos comprenden modelos matemáticos y estadísticos, además de algoritmos para tomar decisiones en problemas relaciones con la planificación, coordinación y ejecución de operaciones en las organizaciones. Algunas aplicaciones de la investigación de operaciones sirven para problemas de asignación de recursos materiales y servicios y planificación de rutas.

1.1.1. Problema de optimización

El problema de optimización consiste en determinar el valor óptimo (valor máximo o valor mínimo) que una función asume sobre los elementos de un conjunto dado.

De un modo preciso, dados un conjunto X y una función que asigna a cada x de X un valor numérico $f(x)$, se desea, para el caso de máximo, encontrar x_0 de X que cumpla la condición:

$$f(x) \leq f(x_0) \text{ para todo } x \text{ de } X$$

Y para el caso de mínimo, un x_1 de X que cumpla:

$$f(x_1) \leq f(x) \text{ para todo } x \text{ de } X$$

En forma abreviada se escribe $f(x_0) = \text{Max } f(x)$, $f(x_1) = \text{Min } f(x)$

Los elementos del conjunto X representan los recursos del problema y $f(x)$ puede ser considerado como el valor del recurso x , por ejemplo, es un costo, un tiempo, una cantidad de producción, etc. A la función $f(x)$ se le denomina función objetivo.

Frecuentemente, el conjunto X se especifica mediante restricciones, que determinan sus elementos, y algoritmos o reglas, que describen cómo obtener elementos de X .

Es posible que el problema no tenga soluciones, porque el conjunto X no tiene elementos o porque la función $f(x)$ no puede tomar un valor máximo o mínimo.

1.1.2. Programación matemática

Los problemas de programación matemática constituyen una parte importante de los problemas de optimización. Un programa matemático tiene la forma:

Maximizar (o minimizar) $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$,

Sujeto a las condiciones o restricciones:

$$g_1(x_1, \dots, x_n) \{ \leq, =, \geq \} b_1$$

$$g_2(x_1, \dots, x_n) \{ \leq, =, \geq \} b_2$$

...

$$g_m(x_1, \dots, x_n) \{ \leq, =, \geq \} b_m$$

donde $f(x_1, \dots, x_n)$, $g_1(x_1, \dots, x_n)$, ..., $g_m(x_1, \dots, x_n)$, son funciones con valores numéricos que dependen de n variables numéricas, x_1, x_2, \dots, x_n . b_1, \dots, b_m son constantes y en cada restricción se emplea uno de los signos \leq , $=$, o \geq , lo que se indica mediante la notación $\{ \leq, =, \geq \}$.

El conjunto X de definición del problema está formado por todos los $x = (x_1, \dots, x_n)$ que satisfacen todas las restricciones. A tales x se les llama soluciones factibles del programa o del problema, y a X , se le denomina el conjunto de soluciones factibles o región de factibilidad.

Generalmente se asume que las variables x_1, \dots, x_n son números reales. No obstante, también se consideran programas matemáticos – llamados de programación entera – en los que las variables toman solo valores enteros.

1.1.3. Modelo de programación matemática

Como indica Maynard Kong en su libro “Investigación de Operaciones”, para resolver un problema de optimización primero se formula un modelo del problema mediante un problema matemático y luego se resuelve el programa matemático.

A partir de la definición o enunciado del problema, los pasos que usualmente se aplican para la formulación o propuesta del modelo son las siguientes:

- Se identifican la cantidad o variable de salida que se desea optimizar y las variables de decisión o de entrada x_1, x_2, \dots, x_n de las que depende y se expresa la primera como una función matemática de las últimas.
- Se determinan las condiciones, requisitos y limitaciones y se expresan mediante restricciones matemáticas que se imponen a las variables de decisión.
- Se incluyen condiciones adicionales que no aparecen de manera explícita pero que deben cumplirse en el problema real, por ejemplo, si algunas variables de decisión han de tomar valores iguales a cero, o si deben tener valores enteros.

Una vez obtenido el modelo del programa matemático se procede a resolverlo aplicando los métodos y técnicas de optimización; esto es, hallar el valor óptimo, si existe, y una solución óptima, o algunos valores en los cuales las variables de decisión proporcionan el valor óptimo.

1.1.4. Formulación del problema de programación lineal

Se dice que una función numérica $f(x_1, \dots, x_n)$ que depende de variables numéricas x_1, x_2, \dots, x_n es lineal si se expresa como una suma de múltiplos de las variables:

$$f(x_1, \dots, x_n) = m_1x_1 + m_2x_2 + \dots + m_nx_n$$

Donde m_1, m_2, \dots, m_n son constantes.

Un problema de programación lineal (PPL) tiene la forma:

Maximizar (o Minimizar)

$$z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

sujeto a las condiciones o restricciones

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \{ \leq, =, \geq \} b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \{ \leq, =, \geq \} b_2$$

...

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n \{ \leq, =, \geq \} b_i$$

...

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \{ \leq, =, \geq \} b_m$$

donde x_1, x_2, \dots, x_n son variables, c_1, c_2, \dots, c_n ; $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{m1}, \dots, a_{mn}$ y b_1, b_2, \dots, b_m son constantes y en cada condición se asume uno de los signos $\leq, =$ o \geq .

Así, tanto la función objetivo $z = z(x_1, \dots, x_n)$ como las funciones que definen los miembros izquierdos de las condiciones o restricciones son funciones lineales de las variables de decisión x_1, x_2, \dots, x_n .

En este caso a las constantes c_1, c_2, \dots, c_n de la función objetivo se les suele denominar costos o coeficientes de costos.

Se llama solución factible a cualquier colección de valores x_1, x_2, \dots, x_n que cumplan todas las restricciones. El problema consiste en determinar el mayor Z_{\max} (o menor Z_{\min}) de los valores de la función objetivo $Z(x_1, x_2, \dots, x_n)$, evaluada sobre todas las soluciones factibles y, desde luego, indicar una solución óptima, esto es, una solución factible que produzca ese valor.

1.2. Algoritmos de optimización de rutas

Un problema de ruteo de vehículos consiste en determinar el conjunto de rutas de costo mínimo que inicien y terminen en los centros de carga y descarga de material (y viceversa), visitando todos los puntos relevantes para el funcionamiento del sistema. Las características de clientes, depósitos y vehículos, así como otras restricciones operativas sobre las rutas generan distintas variantes del sistema e incrementan a la complejidad del mismo.

1.2.1. Clientes

Los clientes tienen una demanda que busca ser satisfecha por el servicio, esta es expresada físicamente en espacio dentro del vehículo de transporte, lo cual limita el transporte a más de un viaje, pues usualmente en un solo viaje no es posible cargar toda la demanda del cliente. Las restricciones más importantes respecto a clientes son: el número de veces que se visita al cliente, el horario en que se puede recoger el bien del cliente, en caso sea restrictivo, y la limitación de vehículos para la visita de los clientes. Este último, por ejemplo, se aplica en el caso de rutas con vehículos asignados a cada una, lo cual limita el transporte de vehículos a ciertos clientes únicamente.

1.2.2. Depósitos

Los depósitos son espacios donde al inicio y final del recorrido se ubican los vehículos y materiales a transportar, si es que hubiera. Los puntos de inicio y final de suelen ser los mismo. Para los casos con múltiples depósitos, la diferencia entre ellos es la ubicación y la capacidad máxima de producción. Algunas veces se considera el tiempo de limpieza previo al inicio de la ruta y el tiempo de carga de material en el depósito.

1.2.3. Vehículos

Los vehículos se manejan en base a su capacidad máxima de almacenamiento. Pueden ser clasificados por peso y volumen. En general, cada vehículo tiene asociado un costo fijo en el que se incurre al utilizarlo y un costo variable proporcional a la distancia que recorre.

En el caso de que los atributos sean los mismos para todos los vehículos se le llama flota homogénea, mientras que cuando hay diferencias, se llama flota heterogénea. La cantidad de vehículos disponibles podría ser una variable de entrada o una variable de decisión. El objetivo más usual suele ser utilizar la cantidad mínima de vehículos y minimizar la distancia recorrida suele encontrarse en segundo lugar.

En general se asume que cada vehículo recorre una sola ruta en el período de planificación.

1.2.4. Formulación matemática

Existen distintos métodos de optimización de rutas, los cuales buscan minimizar la distancia de recorrido y por ende, los costos incurridos y costos asociados. En esta parte, se formulan algunos problemas clásicos que sirven como base para los algoritmos específicos utilizados para la resolución de casos como el de este estudio.

La red de transporte por la que circulan los vehículos es modelada mediante un grafo ponderado $G = (V, E, C)$, comprendido por nodos representados por V , arcos representados por E y costos ponderados para los arcos representados por C . Los nodos del grafo representan a los clientes y depósitos. Los depósitos suelen escribirse como 0 el inicial y $n+1$ el final, mientras que los clientes tienen la nomenclatura $1, \dots, n$. Los arcos $(i, j) \in E$ representan el mejor camino para ir desde i hasta j en la red de transporte. A este se le asocia un costo c_{ij} y un tiempo de viaje t_{ij} . Los grafos no se supondrán como definitivos, debido a que esa flexibilidad es necesaria para realizar las hipótesis. Los nodos adyacentes e incidentes a i serán denotados como $\Delta^+(i)$ y $\Delta^-(i)$ y los arcos incidentes hacia el exterior e interior del nodo i se definen como $\delta^+(i)$ y $\delta^-(i)$.

a. El problema del agente viajero (TSP)

El problema del Agente Viajero trata de un solo vehículo que debe visitar a todos los clientes en una sola ruta y a costo mínimo. No suele haber un depósito (y si lo hubiera no se distingue de los clientes), no hay demanda asociada a los clientes ni restricciones temporales. El problema puede formularse como:

$$\min \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} x_{ij} \tag{1.1}$$

$$\text{s. a.} \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \tag{1.2}$$

$$\sum_{i \in \Delta^-(j)} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V \tag{1.3}$$

$$\sum_{i \in S, j \in \Delta^+(i) \setminus S} x_{ij} \geq 1 \quad \forall S \subset V \tag{1.4}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \forall (i,j) \in E$$

donde S es un subconjunto de nodos. Esta formulación fue propuesta por Dantzig, Fulkerson y Johnson⁷. Las variables binarias x_{ij} indican si el arco (i, j) es utilizado en la solución. La función objetivo (1.1) establece que el costo total de la solución es la suma de los costos de los arcos utilizados. Las restricciones (1.2) y (1.3) indican que la ruta debe llegar y dejar cada nodo una vez. Finalmente, las restricciones (1.4) son llamadas “restricciones de eliminación de sub-tours” e indican que todo S debe ser abandonado al menos una vez. Así se evita que la solución conste de más de un ciclo.

La mayor parte de los problemas de ruteo de vehículos son generalizaciones del TSP. Por ello, este puede considerarse el problema de ruteo de vehículos más simple. No obstante, pertenece a la clase de problemas NP-Hard⁸ y es uno de los problemas de optimización combinatoria más clásico y difundido.

1.3. Aplicación al modelo de optimización de transporte de residuos sólidos

En el transporte de residuos sólidos, no es común encontrar métodos de optimización de rutas, sin embargo, es importante teniendo en cuenta los altos costos del servicio para la recolección, manejo y transporte de residuos sólidos⁹. Usualmente, las rutas son generadas por criterio del Supervisor General de Operaciones en conjunto con los choferes, lo cual brinda deficiencias en el modelo propuesto: numerosas repeticiones de recorrido en las calles del mapa para poder abarcar todo el camino, y selección de caminos muy largos debido a no haber un criterio de minimización de recorrido. Una deficiente propuesta de ruta y una selección de camiones con capacidades no adecuadas, derivarán en deficiente operación y funcionamiento del equipo, desperdicio de personal, reducción de las coberturas del servicio de limpieza y la proliferación de tiraderos clandestinos a cielo abierto¹⁰. Entre las razones por las que no se realizan los

⁷Dantzig, G., Ramser, J.: The truck dispatching problem. Management Science 6. (1959)

⁸ Garey, M., Johnson, D (1979) - Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness. W. H. Freeman and Company.

⁹ Racero, Pérez (2006) – Optimización del sistema de rutas de recolección de residuos sólidos domiciliarios (Ecoeficiencia)

¹⁰ SEDESÓL (1999) – Manual de Técnicas Administrativas para el Servicio de Limpia Municipal.

métodos de optimización de rutas se encuentran los costos de implementación de los sistemas y la falta de conocimiento de parte de los Jefes de Operaciones en implementación de proyectos relacionados al tema.

Según Cerrón en su documento “Diseño de Rutas Óptimas de Recolección de Residuos Sólidos Domésticos mediante el Software Mars”, tradicionalmente hay tres partes importantes de resolución del problema: macroruta, distribución y balance de la ruta y microruta. La macroruta se refiere a dividir la ciudad en zonas y subzonas a grandes rasgos, para uniformizar las características de todas las zonas. La distribución se refiere a dividir y balancear las rutas, determina los días de trabajo y divide las áreas de recolección dentro de las rutas balanceadas para que todas las cuadrillas tengan igual carga de trabajo. Por último, la etapa de Microruteo se refiere a dividir cada subzona en sectores, para resolver un conjunto de problemas aislados.

A continuación se presentan investigaciones sobre optimizaciones de rutas realizadas en distintas partes del mundo. El objetivo es encontrar los métodos que generen mayor solidez al ejecutarse juntos y que mejor se adapten al escenario de una empresa de recojo de residuos sólidos peruana, con operaciones en el norte de Lima.

1.3.1. Optimización de rutas en México

En el 2006, Jesús Racero y Edgar Pérez propusieron una solución al tema de recolección, manejo y transporte de residuos sólidos domiciliarios para Ciudad Victoria en México conscientes de las diferentes características adaptadas de la realidad, y ajustando su modelo a ellas. La finalidad fue obtener un diseño óptimo de recolección, establecer la cantidad y tipo de unidades y el horario ideal para el ruteo, y así evitar inconvenientes a la población.

El término desarrollado en la propuesta fueron las macrorutas, el cual se refiere a la división de la ciudad en sectores operativos y luego la determinación del número de camiones necesarios en cada una y la asignación de un área del sector a cada vehículo recolector. Para ello se inicia con la sectorización, que divide la ciudad en sectores, en caso fuera factible debido a su dimensión y teniendo en cuenta las

características geográficas. Luego la zonificación, la cual consiste en dividir cada sector en zonas que serán cubiertas por un vehículo recolector durante la semana.

Con respecto a la población, el documento estimó la vida de un proyecto de recolección de entre 5 y 8 años, por lo que calcula necesario estimar la población durante 10 años. Con respecto a la frecuencia de recolección, el documento habla de una recolección mínima de 2 veces por semana y se trata de minimizar debido a los costos de este servicio. Debe considerarse sin embargo, el efecto de costumbre y conformidad en la población, lo cual no haría posible esto en el modelo peruano.

Un término relevante para la diferenciación de la optimización de rutas de residuos sólidos es la distancia productiva, que es aquella en donde se cargan residuos sólidos. La no productiva, se llaman distancia muerta. Se tiene entonces la siguiente fórmula de distancia cubierta en la recolección, donde km denota a dicha distancia:

$$km = \frac{P}{d} = \frac{\alpha \times T \times r}{60}$$

donde:

P = población de la zona que atenderá un vehículo en cada turno.

d = densidad de población en hab/km.

α = proporción de la distancia productiva en relación a la distancia total.

T = tiempo disponible para la recolección en minutos.

r = velocidad de avance del vehículo durante la recolección, en km/hrs.

El objetivo de esta fórmula es que exista una igualdad, es decir que los km recorridos sean iguales a los proyectados. Si la distancia proyectada fuera mucho mayor que la real, significaría que el tiempo disponible no alcanzaría para hacer la tarea. Y si en cambio, la distancia real ejecutada fuera mucho mayor a la proyectada, sobraría tiempo y habrían gastos innecesarios.

El diseño de la ruta busca aumentar el valor de α , lo que significa que las distancias productivas sean máximas, usualmente se encuentra entre 0.9 y 0.6.

El número de vehículos necesarios, denotado por N_v , se calcula de la siguiente manera:

$$N_v = \frac{G \times P \times 7 \times Fr \times K}{N \times C \times dh}$$

donde:

G = producción de residuos sólidos en Kg/hab/día

Fr = Factor de reserva

K = Factor de cobertura

N = Número de viajes por turno

C = Capacidad del vehículo en Kilogramos

dh = días hábiles

El tamaño de la cuadrilla de recolección ideal, denotado por N_r , se calcula por:

$$N_r = \frac{N \times C}{R \times H}$$

donde:

R = Rendimiento en kg/Hombre/h

H = Duración de la Jornada en horas

Luego de efectuar la zonificación, se diseñan las rutas en detalle, para lo que se toma en cuenta la traza urbana y topografía de la localidad, el ancho y tipo de calles, el método de recolección, el equipo de recolección, la densidad de población y la generación de residuos sólidos.

Después de todo el proceso anterior, se designa el microruteo. Este hace referencia al recorrido específico que deben realizar diariamente los vehículos recolectores de residuos sólidos. Las variables relevantes para tomar en cuenta son el plano del lugar, el método de recolección, el equipo de recolección, la densidad de población y la generación de residuos sólidos.

Los métodos más recomendables para el microruteo son los determinísticos. En el documento, Racero y Pérez señalan dos como los más importantes: el algoritmo de Little para resolver el problema del agente viajero, enfocado en una demanda discreta, para tiempos de parada fija o en esquinas; y el algoritmo del cartero chino, para una demanda continua, de recolección tipo acera, intradomiciliaria o similar.

Para el caso más ajustado a la realidad de recolección de residuos, el algoritmo del cartero chino es una aplicación de la solución de redes de flujo con arcos dirigidos. Se utiliza el circuito Euler, que hace referencia a toda ruta continua que cubra cada arco de la red al menos una vez. Si los arcos tienen más de una dirección, se pueden utilizar reglas muy sencillas para saber si hay solución de ruta Euler, la cual debe ser impar. En este problema la ruta buscada es la que reduce la distancia viajando a lo largo de las calles (arcos) un sentido único de regreso a su central de correos.

Como conclusión, los autores expresan que es importante conocer las limitaciones de los algoritmos de los modelos. También que un sistema de rutas bien diseñado trae como consecuencia que el servicio de recolección y transporte de residuos sea eficiente, basándose en la reducción de costos de operación y mantenimiento, reducción de las distancias muertas, aprovechamiento de la capacidad de los vehículos recolectores y mayor colaboración del personal al darse cuenta que los nuevos recorridos le permiten ahorrar trabajo improductivo. Es importante también acotar que el documento comenta la importancia de informar adecuadamente al público en general, mediante fundamentación lógica pues es necesaria su aprobación.

1.3.2. Uso e implementación de métodos meta heurísticos de tipo tabú para resolución de problemas de optimización duros

Reyes y Sandoya¹¹ proponen la utilización del método Tabú, conocido como metaheurístico debido a que se los utiliza para resolver problemas de la complejidad determinada. Este documento trabaja el tema de recolección de residuos sólidos como un problema NP-Hard, debido a la complejidad que el modelo a resolver representa.

En el problema de rutas de vehículos (VRP) bajo restricciones de capacidad y distancia que envuelven el diseño de mínimo costo de las rutas que los vehículos recorren, iniciando y terminando en una terminal la cual brinda en servicio a los clientes. Cada cliente y ruta es cubierto exactamente por una ruta del vehículo. La demanda de cada vehículo no debe exceder la capacidad del vehículo. La propuesta fue ejercer primero este modelo y luego, ejecutar el método Tabú para complementar el modelo y encontrar los óptimos.

Como resultados, el documento cita un ejemplo de una reducción de rutas de 10 a 9 respecto al modelo actual, y la solución objetivo se redujo de 2,495.5 a 1,308.1 unidades monetarias, y para el segundo caso, si bien aumentaron 3 rutas, se redujo la solución objetivo de 3,172.0 a 2,136.1 unidades monetarias. Ambos montos calculados con base en el costo del recorrido. Se define entonces el método como satisfactorio. Se destaca en el documento el carácter agresivo de la búsqueda, y su adaptabilidad para tomar soluciones de otros algoritmos y a partir de ahí obtener una mejor solución.

1.3.3. Resumen de solución propuesta

Para el problema propuesto, primero se analizará el alcance a trabajar. A partir del alcance definido, se trabajarán con dos análisis, macroruteo y microruteo.

Con respecto al macroruteo, se designarán las áreas elegibles para la distribución. Como siguiente paso, se define la distribución mediante la sectorización de rutas con base en los volúmenes de basura por zona y se define también el número de camiones, con el asignado de trabajadores por camión.

¹¹ Uso e Implementación de métodos meta heurísticos de tipo tabú para resolución de problemas de optimización duros

Luego de seleccionados los sectores, para cada uno de ellos se efectuará el desarrollo del microruteo. Este consiste en realizar el modelo basado en el Método del Agente Viajero TSP, y luego en realizar un ajuste manual de acuerdo a las características específicas del modelo a optimizar. Finalmente, se encuentran las eficiencias cuantificadas en la evaluación económica y financiera.



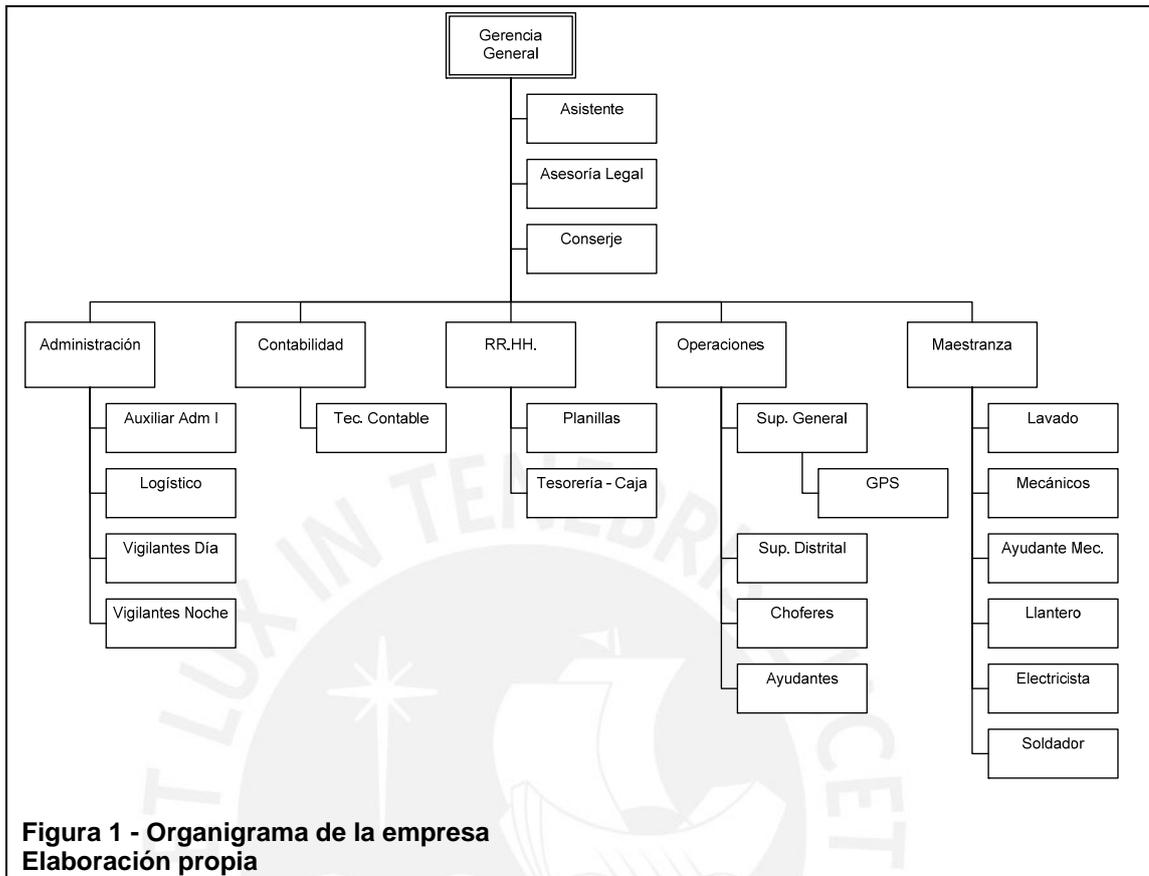
CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE LA EMPRESA

2.1. Aspectos Generales

La empresa es una prestadora de servicios. Se dedica a la recolección y transporte de residuos sólidos, a nivel de recolección domiciliaria, industrial y de comercio, en cinco distritos de Lima (Independencia, Lince, Los Olivos, Pueblo Libre y Santa Anita) además de la provincia constitucional del Callao. Su Centro de Operaciones se encuentra en el distrito de Los Olivos, donde se ubican la sede administrativa, el taller y el estacionamiento de vehículos. El relleno sanitario donde transportan los desperdicios se encuentra en Ancón.

La empresa cuenta con 39 vehículos compactadores propios (Ver anexo 1) y 10 vehículos alquilados, pertenecientes a terceros. Cada vehículo propio tiene una capacidad de carga de 13 toneladas, las cuales son consideradas para la designación de rutas en el contrato. Volumétricamente, las cajas compactadoras de los vehículos tienen 20 metros cúbicos de capacidad. En cuanto a los vehículos alquilados, estos se acomodan a las necesidades de la empresa y las rutas a abastecer, actualmente tienen distintas capacidades. Los vehículos son adquiridos en base a la norma legal, que indica que el peso máximo que puede cargar un camión de basura bordea las 9.6 toneladas. Los camiones de tercero siguen este límite máximo, pero no existe un criterio para definir el peso del vehículo a alquilar.

Existen 275 trabajadores involucrados a la empresa, de los cuales 250 son conductores y apoyo a conductores, y los demás pertenecen a la parte Administrativa. La empresa es liderada por una Gerencia General, y cuenta con cinco áreas principales: Administración, Contabilidad, RR. HH., Operaciones y Maestranza, como se muestra en la Figura 1.



La gestión de transporte de residuos sólidos se ubica en el área de Operaciones de la empresa. El Supervisor General se encarga de establecer las rutas junto con los choferes de las rutas y luego con ayuda del programa de locación por GPS analiza el seguimiento del plan de ruteo. Asimismo, hay áreas de soporte para el transporte: Maestranza, que es el área encargada de mantener los vehículos en buen estado, Administración, Contabilidad y Recursos Humanos.

Existen tres intervalos de tiempos normales de ingreso y salida de vehículos en los que la empresa puede operar para los cinco distritos: mañana, tarde y noche.

Cada distrito puede tener una configuración distinta que varía según la necesidad. La distribución actual de vehículos para los 5 distritos y provincia se encuentra definida en la tabla 1. Existe parte de estos vehículos que se encuentran en mantenimiento, y por tal motivo no se toman en cuenta para los turnos.

Tabla 1 - Horarios de rutas por distrito

Región	Turno	Cantidad de Vehículos	Horario	Rutas	Galones/Día
Los Olivos	Día	1	06:30 a 16:30	21	200
	Noche	12	19:00 a 04:00		
Independencia	Día	10	06:30 a 13:00	8	110
	Día	1	07:00 a 09:00		
	Noche	2	17:00 a 04:00		
Lince	-	1	Todo el día	5	70
	Noche	4	16:10 a 04:00		
Santa Anita	-	1	Todo el día	14	150
	Noche	9	19:00 a 04:00		
Pueblo Libre	Día	1	06:00 a 15:00	6	95
	Noche	6	19:00 a 02:00		
Callao	Día	16	06:00 a 14:00	27	580
	Tarde	14	14:00 a 22:00		
	Noche	7	22:00 a 06:00		

Elaboración propia

Cada distrito y provincia tiene rutas definidas, las cuales son asignadas por los supervisores de las áreas a los choferes, una ruta por chofer y turno. Estas rutas son designadas por la Municipalidad con consentimiento de la empresa y se basan en la distribución urbana-geográfica del distrito, sin embargo no se sigue ningún método de optimización de rutas. Con respecto a Los Olivos, en la figura 2 se observa la delimitación del distrito mediante Google Maps y en la figura 3 la división de sectores que actualmente maneja la empresa. Por cada sector pasa un camión. El detalle de las 21 rutas se encuentra en el anexo 2.

Las rutas de Los Olivos tienen distintos tiempos de recorrido y distancia recorrida. En la tabla 2, se puede hallar el detalle de cada una de ellas, calculadas a partir de un promedio de los recorridos de una semana.

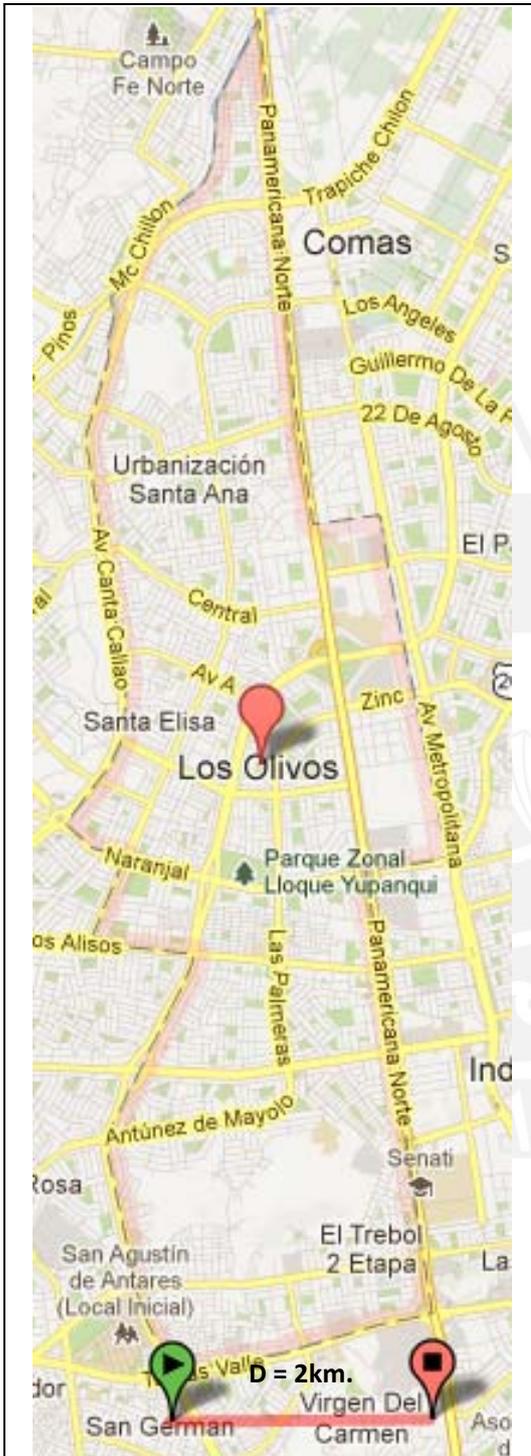


Figura 2 - Mapa de Los Olivos
 Fuente: Google Maps (2012)

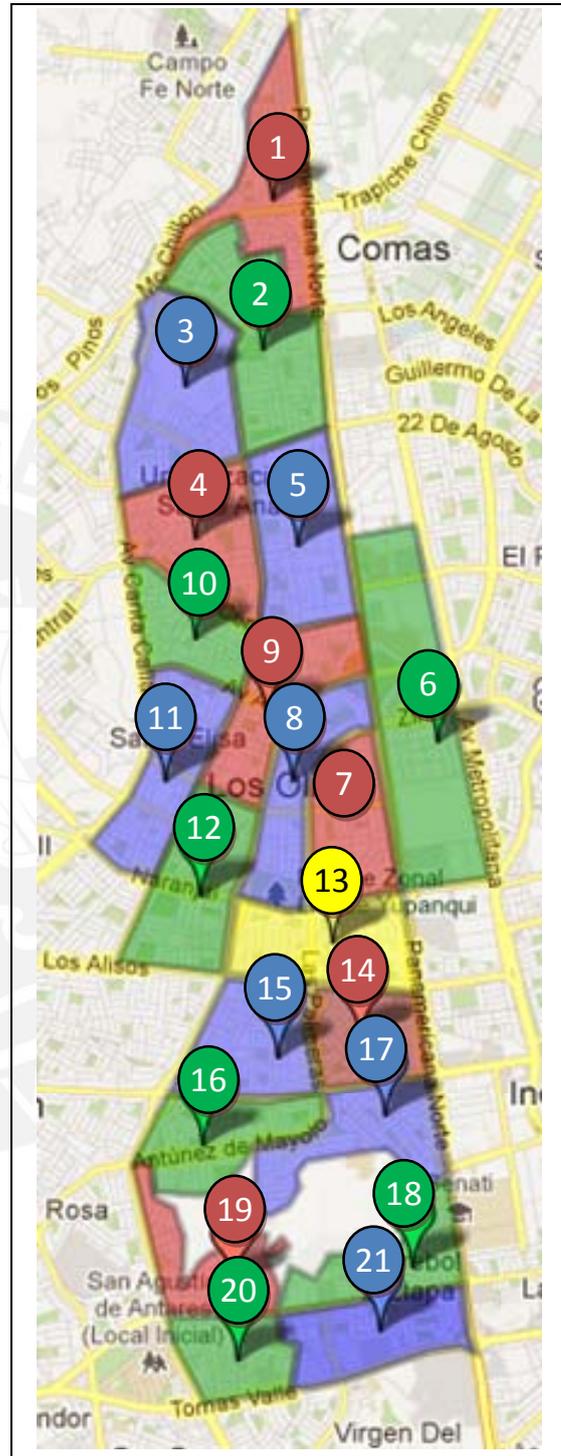


Figura 3 - Mapa de Los Olivos dividido en rutas de recojo
 Fuente: Google Maps (2012)

Tabla 2 – Distancias y tiempo promedio de recorrido por ruta

Rutas	Distancia promedio (km)	Tiempo promedio (horas)
1	19.60	03:42:39
2	23.80	03:32:24
3	19.87	03:03:15
4	17.87	03:26:53
5	19.47	03:30:43
6	19.45	03:07:46
7	11.27	03:10:47
8	13.53	02:52:07
9	18.33	03:01:34
10	13.77	02:48:24
11	19.03	02:52:55
12	16.03	03:13:10
13	18.00	03:27:00
14	11.57	03:23:37
15	14.65	03:38:44
16	19.15	03:35:25
17	15.07	03:45:43
18	13.80	03:06:44
19	9.43	02:01:16
20	6.90	02:03:22
21	6.40	01:35:23
TOTAL	326.98	64:59:51

Elaboración propia

Actualmente, no existen indicadores dentro de la empresa para ninguna de sus áreas ni reportes que permitan cuantificar estos indicadores, lo cual no permite apreciar de una manera asequible el logro cuantificable de los puntos importantes de la empresa, y por ende no se tiene claro el tema de cumplimiento de objetivos.

2.2.

ción

Administra

El área administrativa se encarga de manejar los contratos y velar que lo escrito se cumpla en la práctica. Todas las unidades cuentan con sistema GPS, para conocer la

posición del vehículo a tiempo real. La posición es actualizada cada 30 segundos y funciona mientras el vehículo esté encendido. La plataforma de GPS combina la ubicación de los aparatos con una herramienta informática de mapas de la ciudad. Estos son monitoreados y controlados por el Administrador, el cual cuenta con acceso a una plataforma de visualización de Ruta, para monitorear el estado actual, el recorrido y los tiempos históricos. Los aparatos GPS averiados no son reportados en la plataforma, únicamente se observan cuando se ingresa al reporte y este se encuentra sin información. El Supervisor General de Operaciones es quien conoce los GPS averiados. Además, permite generar reportes por ruta, vehículo y horas.

Se utiliza la información del GPS para crear un reporte manual, el detalle del procedimiento para la creación se observa en la figura 4. En la tabla 3 se detallan los campos a completar para cada reporte manual diario. Este reporte manual no es completado todos los días debido a la demora de ejecución ya que se completa manualmente. Las hojas diarias son guardadas en un mismo archivo. No existe, sin embargo, información planificada dentro del reporte que indique qué tan alineados a los requerimientos del contrato se encuentran los recorridos. Un ejemplo de reporte para un día se detalla en el anexo 3.

La ruta para cada distrito se define por la Municipalidad durante el contrato. Esta definición es presentada por la Municipalidad y se firma el contrato. Luego de eso, la empresa proveedora del servicio tiene cierto tiempo acordado en el contrato para redefinir la ruta, debido a que pueden existir ciertas restricciones prácticas en el recorrido no mapeadas al momento de elaborar la ruta. Existen modificaciones en el camino, que son entregadas por el Supervisor de la Municipalidad al chofer de ruta, pero estas nuevas rutas no son entregadas al Supervisor de la empresa, solamente es informado. Algunas veces estas modificaciones duran sólo días y es debido a los distintos eventos de la Municipalidad en la zona que alberga la ruta.

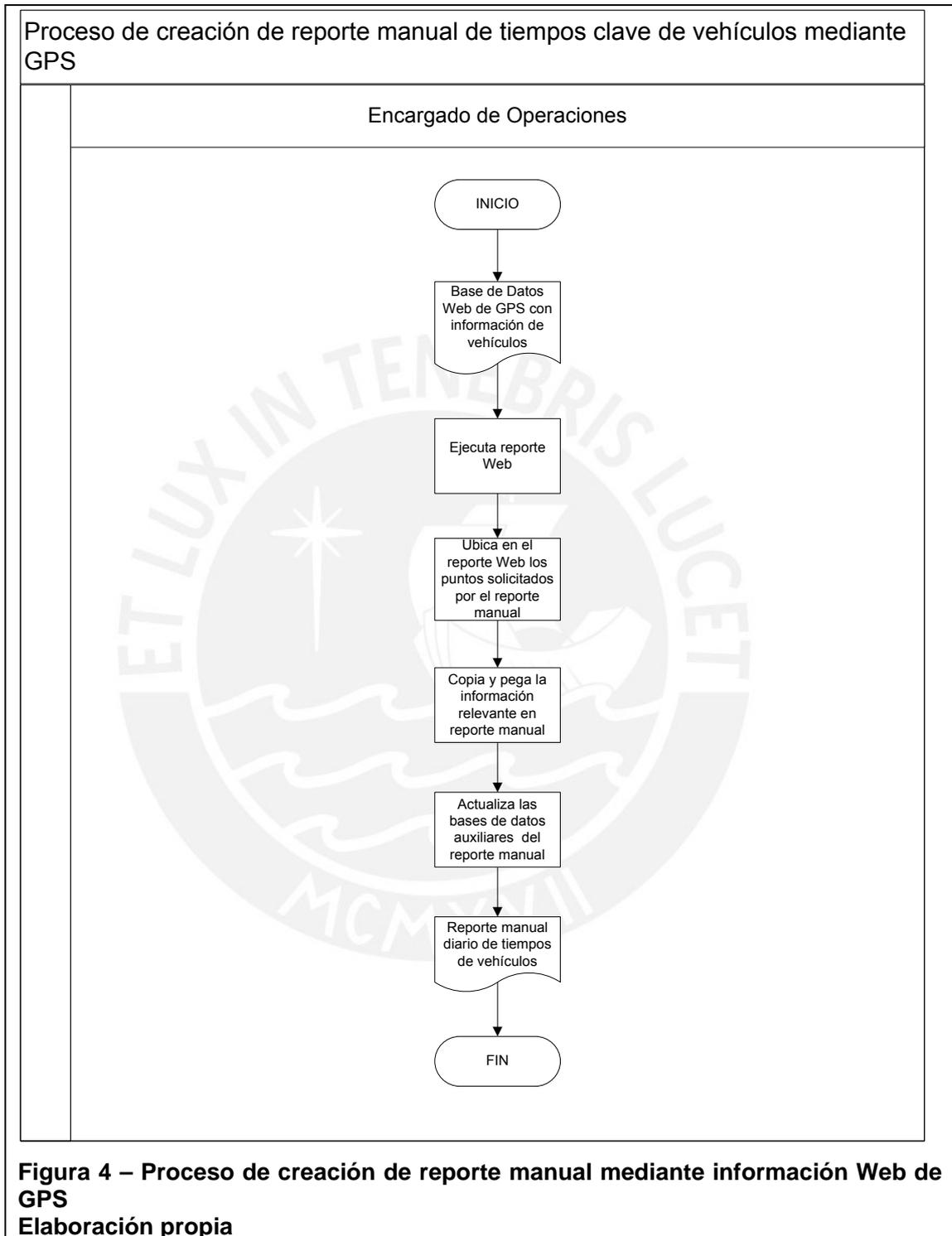


Tabla 3 - Detalle de campos del reporte diario

Tipo de campo	Nombre de campo	¿Es obligatorio?
Características del vehículo	Código de Unidad	Sí
	Placa	Sí
	Clase	Sí
	Carrocería	Sí
	Marca	Sí
Características del chofer	Código de Chofer	Sí
	Nombres y Apellidos	Sí
	Celular RPC	Sí
Ayudantes	Código de Operario 1	No
	Apellidos y Nombres	No
	Código de Operario 2	No
	Apellidos y Nombres	No
	Código de Operario 3	No
	Apellidos y Nombres	No
Distrito	Código de Distrito	Sí
	Distrito	No
Tiempos del recorrido	Hora Salida Empresa	Sí
	Inicio de Distribución	Sí
	Término de Distribución	Sí
	Ingreso a Relleno	Sí
	Salida de Relleno	Sí
	Distrito de Repaso	No
	Inicio de Repaso	No
	Término de Repaso	No
	Ingreso a Relleno 2	No
	Ingreso a Relleno 2	No
	Hora de Llegada a Base	No
	Tiempo de Conducción	No
Horas de Conducción	No	
Otros	Observaciones	No

Elaboración propia

2.3. Operaciones

El área de operaciones se encarga de aplicar la ejecución de los contratos, y controlar que el recojo de residuos sólidos se ejecute de la manera prevista y con la mayor eficiencia posible. Para que esto ocurra, cada distrito o provincia cuenta con un supervisor asignado, que se encarga de mantener la eficiencia del proceso. El supervisor es el encargado de asignar las rutas y controlar el seguimiento de los compactadores y el volumen ocupado al momento de llegar al relleno sanitario. Esto debido a que existe un mínimo de volumen ocupado para que los trabajadores sean compensados como una jornada laboral completa. En el caso de los vehículos propios, se refiere a 5 toneladas de las 13 de capacidad total. La compensación es igual para todos los asistentes así como para todos los choferes, cada grupo con cierto monto estipulado en el contrato. Sin embargo, sí existen recorridos de notoriamente mayor duración que otros.

La ejecución actual de las rutas es detallada en la figura 5. Para el distrito de Los Olivos, son tres ayudantes designados por camión desplegado. Una vez que se realiza la ruta, se realiza un repaso de ciertas zonas, el cual es una repetición de ruta con el objetivo de recoger completamente los residuos. El repaso es aproximadamente 30% del tiempo inicial de recojo.

Existen ciertos materiales que pueden ser utilizados para reciclaje, pero la empresa no cuenta con la autorización para realizar ese servicio. Existen también rutas en las cuales otros servicios similares se hacen efectivos; por ejemplo, recolectores de basura para chanchos. Ellos actúan a la par con los recogedores de basura, sin embargo no son complementarios pues no tienen horarios ni rutas definidas.

El acceso a todas las zonas del mapa se dificulta debido a la existencia de rejas por todo el distrito, lo cual limita la definición de rutas. Los ciudadanos sin embargo, no distinguen estas observaciones, y colocan la basura en sus puertas, haciendo que el camión tenga que recorrer todas las zonas bloqueadas, y avance y retroceda por el

mismo

camino.



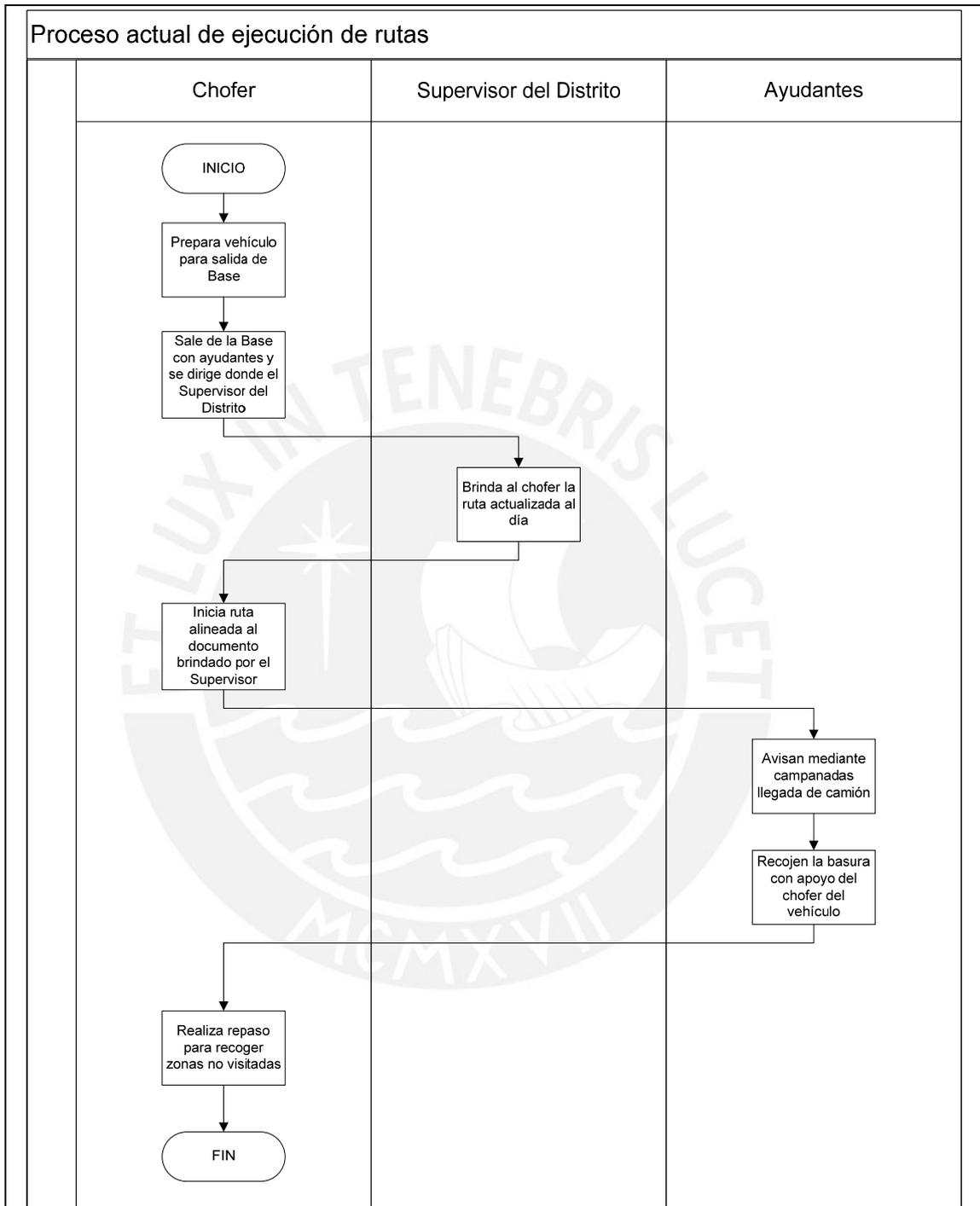


Figura 5 – Proceso actual de ejecución de rutas
Elaboración propia

Una vez finalizada la ruta, el chofer se dirige al relleno sanitario, donde se le mide el volumen almacenado, se recogen los residuos, se vacía el camión y este regresa a la base de la empresa. Es ahí donde el supervisor revisa el volumen, para confirmar la penalización y si no es así, se le paga el monto uniforme para todos los trabajadores.

2.4. Recursos Humanos

El área de Recursos Humanos es la encargada del reclutamiento y selección de empleados, además de manejar las planillas de los trabajadores. No existen, sin embargo, indicadores que permitan medir la eficiencia y esfuerzo de cada trabajador. Tampoco existen indicadores de rotación. Recursos Humanos sólo cuenta con información histórica de sus trabajadores en documentos sueltos, mas no en reportes.

2.5. Maestranza

La disponibilidad de flota actual por día es aproximadamente del 85%, debido a que en promedio, el 15% de los vehículos se encuentra en el taller. El ideal debería ser 94%. Este real es un estimado, pues no existe un histórico de información de vehículos en el taller. Los ingresos y salidas del taller son colocados en una pizarra en el patio del taller, no hay orden de servicio. Una vez termina el día, los datos son borrados de la pizarra, y no existe una base de datos donde se registre esta información ni tampoco documentación vinculada. Tampoco hay mantenimiento preventivo, cambios de faja ni RTNs disponibles. No se tienen indicadores de la capacidad ociosa.

Dentro del taller, existe un almacén de 80m². 60m² son para el almacenamiento ordenado de piezas en anaqueles y 20m² para el almacenamiento de refrigerantes y aceites. Los anaqueles manejan una estructura pero esta no es aplicada en la práctica, los artículos del taller se encuentran desordenados e inclusive en el suelo. El encargado del almacén no se encuentra todo el tiempo en el lugar, y cualquier

trabajador puede ingresar y retirar las piezas que necesite, apuntando su nombre y la pieza que retira en una lista que se encuentra en el escritorio del lugar. Las piezas cuentan con código de artículo, pero estos no son utilizados en la práctica. No se han reportado pérdidas valiosas en el almacén.

Los productos en el almacén son reutilizados mientras sea factible. Para los productos que se necesitan pero no se tiene stock, se utiliza el método JIT para comprarlos inmediatamente mediante crédito (hasta cierto monto límite). Luego se normaliza la operación mediante la aprobación de un superior, la cual se realiza en paralelo a la compra. Si la compra no es aprobada, es devuelta.

En cuanto al almacenamiento de refrigerantes, existe rotura de stock debido al llenado manual de líquido de parte de los trabajadores del taller. Estos líquidos se encuentran en barriles en una parte del almacén, y la forma de extracción es mediante mangueras, sin embargo este proceso genera pérdida de líquidos debido al método de extracción.

2.6. Rutas

Las 21 rutas fueron analizadas para un día promedio. Las cargas promedio de los camiones para el año 2012, desde enero hasta septiembre se pueden observar en la tabla 4. Para el mismo periodo, en la tabla 5 se detalla la distribución de toneladas por área y por ruta.

Tabla 4 – Cargas Promedio del año 2012 al mes de Septiembre

Ruta	Promedio carga (t)	Máxima carga (t)
1	9.05	11.99
2	8.20	9.92
3	6.55	8.75
4	8.54	10.80
5	8.51	11.49
6	4.66	7.73
7	10.17	12.00
8	9.26	11.72

Tabla 4 – Cargas Promedio del año 2012 al mes de Septiembre

Ruta	Promedio carga (t)	Máxima carga (t)
9	9.40	11.20
10	8.68	9.94
11	6.41	10.20
12	6.80	9.570
13	8.60	10.05
14	6.45	9.44
15	9.72	12.15
16	7.24	9.44
17	9.87	12.07
18	10.03	12.00
19	6.04	8.032
20	6.58	11.44
21	10.34	12.68
TOTAL	136.89	178.94

Elaboración propia

Tabla 5 – Distribución de toneladas por área por ruta para el 2012 al mes de Septiembre

Ruta	Área (km ²)	Promedio carga (t)	Carga por área (t/km ²)
1	0.92	9.05	9.84
2	0.99	8.20	8.27
3	0.70	6.55	9.32
4	0.87	8.54	9.85
5	0.99	8.51	8.64
6	1.78	4.66	2.62
7	0.71	10.17	14.27
8	0.76	9.26	12.23
9	0.79	9.40	11.88
10	0.55	8.68	15.84
11	0.82	6.41	7.84
12	0.88	6.80	7.72
13	0.86	8.60	9.98
14	0.59	6.45	11.02
15	0.81	9.72	11.96
16	0.74	7.24	9.83
17	0.74	9.87	13.36
18	0.51	10.03	19.79

Tabla 5 – Distribución de toneladas por área por ruta para el 2012 al mes de Septiembre

Ruta	Área (km ²)	Promedio carga (t)	Carga por área (t/km ²)
19	0.57	6.04	10.59
20	0.70	6.58	9.34
21	0.52	10.34	20.03

Elaboración propia

Teniendo en cuenta que cada camión tiene como carga promedio aceptada 9.6 toneladas, se observa en la tabla 4 que la distribución del promedio de carga por ruta no es uniforme; mientras existen casos de poco promedio como la ruta 6, existen otros que superan la media como la ruta 7. Nos encontramos, entonces, ante un caso de mala distribución de rutas, donde algunas finalizan la ruta con menos de la capacidad permitida legal del vehículo y otras finalizan con más carga que la capacidad permitida.

Además, el hecho de que no existan rutas fundamentadas mediante un modelo de programación dificulta la programación ordenada del servicio y la comunicación con los vecinos, debido a que no existen rutas estimadas con tiempos que permitan informar con seguridad sobre tiempos de recojo de basura y así generar un hábito en los vecinos que disminuya el tiempo de espera para el recojo.

CAPÍTULO 3. SOLUCIÓN PROPUESTA

La solución propuesta se enfoca en el proceso de valor más importante de la empresa: el recojo de los residuos sólidos. Para este motivo, se inicia con una descripción de las actividades previas, la mejora de ciertos procesos necesarios para la optimización de rutas, incluyendo los indicadores para una mejor gestión. Luego se procede a ejecutar el modelo propuesto. Por último, se presentan los beneficios cualitativos y amenazas relacionadas al proyecto.

3.1 Sectorización de Rutas

Se eligió el distrito de Los Olivos como base para proponer el modelo de optimización de rutas, debido a su considerable amplitud respecto a otros distritos, el tiempo de trabajo en el distrito y la variedad de sectores que presenta el distrito: existen tanto zonas comerciales como urbanas e industriales. Con respecto a la complejidad del recorrido, se pueden encontrar zonas de recojo ubicadas en faldas de cerros o en calles pequeñas de difícil recorrido. Para ejecutar la propuesta, primero se analizó la distribución actual de rutas y la utilización de la capacidad de carga disponible de la flota asignada.

La flota asignada a este distrito es homogénea, es decir todos los vehículos tienen la misma capacidad. Ante esto, la capacidad permitida de cualquier camión es de 9.6 toneladas según ley. Sin embargo, la máxima posible es de 13 toneladas. Por tal motivo, se utiliza la constante de 9.6 toneladas para calcular el número necesario. Se tiene en cuenta que el Factor de reserva (Fr) es 1, y el Factor de Cobertura (K) también es 1, y el número de días hábiles (dh) es de 7, el número de viajes (N) es 2. En cuanto a la producción de residuos sólidos ($G \times P$) es 171.1 kg/día. Entonces tenemos:

$$N_v = \frac{G \times P}{2 \times C} = \frac{171.11}{19.2} = 8.91 \approx 9 \text{ veh\u00edculos}$$

Se obtiene que la cantidad necesaria de veh\u00edculos es de 9 veh\u00edculos. Actualmente se utilizan 11 veh\u00edculos. Existe un posible ahorro de dos veh\u00edculos, lo cual se ver\u00e1 reflejado en los gastos no incurridos, dentro del an\u00e1lisis econ\u00f3mico y financiero.

Al existir 9 veh\u00edculos, existen como m\u00e1ximo 18 rutas que permitir\u00e1n alcanzar el \u00f3ptimo de veh\u00edculos. Es por ello que se reorganizan las rutas de acuerdo con la capacidad m\u00e1xima, y con la informaci\u00f3n de las toneladas recogidas por ruta. El detalle de la distribuci\u00f3n por ruta y volumen se observa en la Tabla 6. En dicha tabla se puede ver la primera columna con los n\u00fameros de las nuevas rutas y en la siguiente columna, la distribuci\u00f3n de toneladas asignadas a la nueva ruta y, entre par\u00e9ntesis, las rutas antiguas.

Tabla 6 – Nueva distribuci\u00f3n de toneladas por ruta propuesta

Nuevas Rutas	Toneladas (Ruta antigua 1)	Toneladas (Ruta antigua 2)	Toneladas (Ruta antigua 3)	TOTAL (t)
1	9.05 (1)	0.46 (2)		9.51
2	7.74 (2)	1.77 (3)		9.51
3	4.78 (3)	4.73 (4)		9.51
4	3.81 (4)	5.7 (5)		9.51
5	2.81 (5)	4.66 (6)	2.04 (7)	9.51
6	8.13 (7)	1.38 (8)		9.51
7	7.88 (8)	1.63 (9)		9.51
8	7.77 (9)	1.74 (10)		9.51
9	6.94 (10)	2.57 (11)		9.51
10	3.84 (11)	5.67 (12)		9.51
11	1.13 (12)	8.38 (13)		9.51
12	0.22 (13)	6.45 (14)	2.84 (15)	9.51
13	6.88 (15)	2.63 (16)		9.51
14	4.61 (16)	4.9 (17)		9.51
15	4.97 (17)	4.54 (18)		9.51
16	5.49 (18)	4.02 (19)		9.51
17	2.02 (19)	6.58 (20)	0.91 (21)	9.51
18	9.43 (21)			9.43

Elaboraci\u00f3n propia

Teniendo en cuenta el factor de carga por área (t/m^2) del capítulo anterior, Se transforma la información de t a m^2 , obteniendo resultados indicados en la Tabla 7.

Tabla 7 – Distribución de las áreas de las nuevas rutas respecto a las antiguas

Nuevas Rutas	m^2 (Ruta antigua 1)	m^2 (Ruta antigua 2)	m^2 (Ruta antigua 3)	Área total (m^2)
1	0.92	0.06		0.98
2	0.94	0.19		1.13
3	0.51	0.48		0.99
4	0.39	0.66		1.05
5	0.33	1.78	0.14	2.25
6	0.57	0.11		0.68
7	0.64	0.14		0.78
8	0.65	0.11		0.76
9	0.44	0.33		0.77
10	0.49	0.73		1.22
11	0.15	0.84		0.99
12	0.02	0.59	0.24	0.84
13	0.58	0.27		0.84
14	0.47	0.37		0.84
15	0.37	0.23		0.60
16	0.28	0.38		0.66
17	0.19	0.70	0.05	0.94
18	0.47			0.47

Elaboración propia

El criterio para clasificar las áreas como se muestra en la tabla 7, es que las áreas con las que se forman los nuevos espacios sean contiguas y permitan un flujo cómodo para la creación de la ruta del vehículo. La sectorización de los nuevos mapas se muestra a gran escala en la figura 6. La sectorización de cada mapa se encuentra detallada en el anexo 4. A partir de esta propuesta se ejecutará el modelo de optimización de rutas para cada nuevo recorrido.

3.2 Modelo de Optimización de Rutas

Para construir la fórmula objetivo para el modelo de optimización, se tomará como base el Método del Agente Viajero TSP. El modelo genera rutas óptimas y, dado que un camión puede recorrer por día dos rutas, el número de rutas existentes será igual al



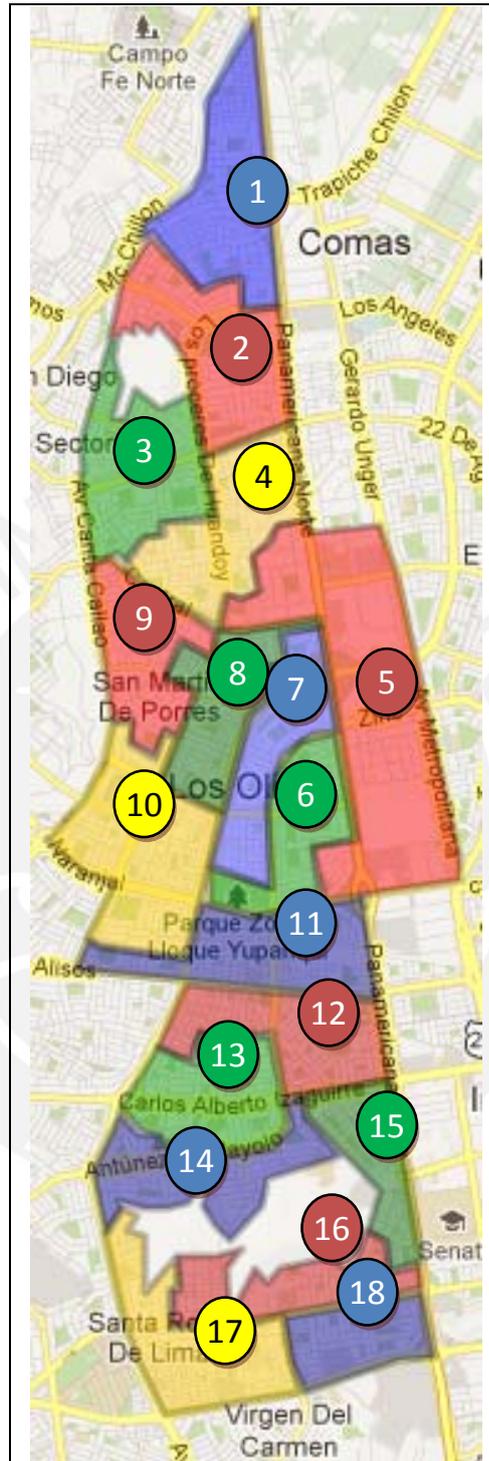


Figura 6 – Nueva distribución de rutas
Elaboración propia

doble del número de camiones disponibles. La fórmula objetivo necesita multiplicar las veces que se utiliza cada arco por una constante asociada al costo del arco. Esta constante se define en base al tipo de recorrido del vehículo. Este es a velocidad baja y constante, por tal motivo, tomando en cuenta las características de un vehículo común¹², el gasto en gasolina y por ende los costos asociados dependerán directamente de la distancia recorrida. La distancia recorrida será la constante asociada.

El cruce por las esquinas del mapa será obligatorio, lo cual permitirá recoger la mayoría de la basura dentro del camino y tener visibilidad del recojo en todas las calles, pues se podrá visualizar desde las esquinas si la basura de las calles ha sido recogida. En los nuevos mapas propuestos, se ha determinado cada arco como una variable, compuesta de dos nodos, que son las esquinas de las calles. Los mapas con los nodos propuestos se encuentran en el anexo 5. En el anexo 6 se encuentran las tablas con todas las combinaciones de arco posibles, por mapa.

A partir de esta información, se realizó una función objetivo que minimice la distancia total recorrida. El camino obligatorio a recorrer se definió según las características de la empresa. El camión de basura de la empresa tiene que dejar limpia toda la ruta, sin embargo eso no necesariamente significa que el camión tiene que recorrer todas las calles, como se puede observar en las rutas del anexo 2. El camión pasa por la mayoría de caminos pero no por todos, pues los caminos por los que no pasa son recogidos por un triciclo de la empresa, por los mismos trabajadores que recorren el camino a pie, por una empresa recolectora de alimentos para cerdo o no se recorre debido a la formación de centros de acopio que permitan recoger la basura desde puntos estratégicos.

A partir de esto, se define que la manera más efectiva de definir la ruta es mediante las esquinas del mapa como puntos de paso obligatorios, teniendo en cuenta que se deberán recorrer todos los puntos, para que todas las calles queden cerca de una parte

¹²http://www.ehowenespanol.com/calcular-consumo-gasolina-bote-como_3283/

de la ruta, y así se puedan aplicar las acciones necesarias para completar el recorrido, ya sea decidiendo el pase de un triciclo, o el apoyo de los recogedores.

Las restricciones que tiene el modelo son las siguientes:

- Primero, el vehículo debe cruzar todos los nodos del mapa. Para esta restricción, se tendrá en cuenta cada camino existente. Para cada nodo se tendrán diferentes restricciones. Si es un camino de sólo una entrada o salida, entonces se colocará como restricción el único arco adyacente a ese nodo, y se le colocará una restricción de menor o igual a 2 (entrada y salida). Para los caminos de 2 o más arcos adyacentes, se utilizará la restricción de que la suma de todos los arcos será mayor igual a 2, y que la suma de los arcos de un subconjunto de ese grupo, de tamaño $n-1$ arcos, será 1. Esto, debido a que se busca con el modelo que la entrada y salida sea por puntos diferentes, para diversificar el camino. En el caso específico de los nodos con sólo dos rutas adyacentes, no será necesario colocar la fórmula de la suma de nodos mayor igual a 2, pues restringiéndolas cada una a mayor a igual a uno, se deduce la otra fórmula, y su descripción en el modelo sería redundante.
- Segundo, la suma de todas las distancias debe ser menor al equivalente en distancia del tiempo disponible para recorrer la ruta. Debido a que este tiempo es muy alto en comparación a la solución propuesta (para cada ruta existen 4 horas disponibles), no será relevante al modelo, pues la restricción será muy alta. Teniendo en cuenta que un camión de basura avanza a 7 km/h en promedio según data histórica, se tendría disponible 28,000 metros de distancia recorrida para cada ruta. No se colocará en el modelo, pero se tendrá en cuenta al momento de revisar las soluciones.

Para este modelo no se tendrá en cuenta la restricción de subnodos, debido a que no es una restricción exclusiva de este tipo de ruta, pues la solución real será adaptando el modelo a la práctica, lo que significa que la restricción de subnodos podría considerarse en el ajuste del modelo empírico. Una vez resueltos los modelos, se

conectarán los subnodos al recorrido del camión, y se evaluarán las nuevas condiciones del camino.

La formulación matemática es la siguiente:

$$\min \sum_{i,j \in E} d_{ij} x_{ij}$$

$$s. a. \left\{ \begin{array}{l} \text{Si } n_{j \in \Delta^+(i) \cup \Delta^-(i)}(x_{ij}) = 1: \sum_{j \in \Delta^+(i) \cup \Delta^-(i)} x_{ij} \geq 2 \\ \text{Si } n_{j \in \Delta^+(i) \cup \Delta^-(i)}(x_{ij}) > 1: \sum_{j \in \Delta^+(i) \cup \Delta^-(i)} x_{ij} \geq 2 \quad \forall i \in A \\ n(C) = (n_{j \in \Delta^+(i) \cup \Delta^-(i)}(x_{ij})) - 1; \forall C \in n_{j \in \Delta^+(i) \cup \Delta^-(i)}(x_{ij}) \end{array} \right.$$

$$\sum_{i,j \in E} d_{ij} < 28,000$$

donde:

i, j = nodos existentes

E = Conjunto de arcos disponibles a recorrer

d = Distancia en metros de cada arco (metros)

x = decisión de recorrer el arco, $x \in \{0,1\}$

C = subconjunto de soluciones

$\Delta^+(i)$ = nodo adyacente a i

$\Delta^-(i)$ = nodo subyacente a i

Luego de correr los modelos del anexo 7, se ejecutan en LINGO los archivos. Para cada mapa se hallaron arcos sugeridos a recorrer, detallados en el anexo 8. El detalle de la solución del LINGO se encuentra en el anexo 9. Respecto a los resultados, se encontró que los arcos que tienen valor 0, indican que no es necesario pasar por esos arcos y los que tienen 1 significan que son arcos por los que sí tiene que pasar el modelo. También existen datos cuyo valor está entre 0 y 1. Estos casos se tomaron como parte de la solución de la optimización, debido a que tienen un valor mínimo, lo cual implica necesidad de ser usados como parte de la solución objetivo para el funcionamiento correcto del sistema.

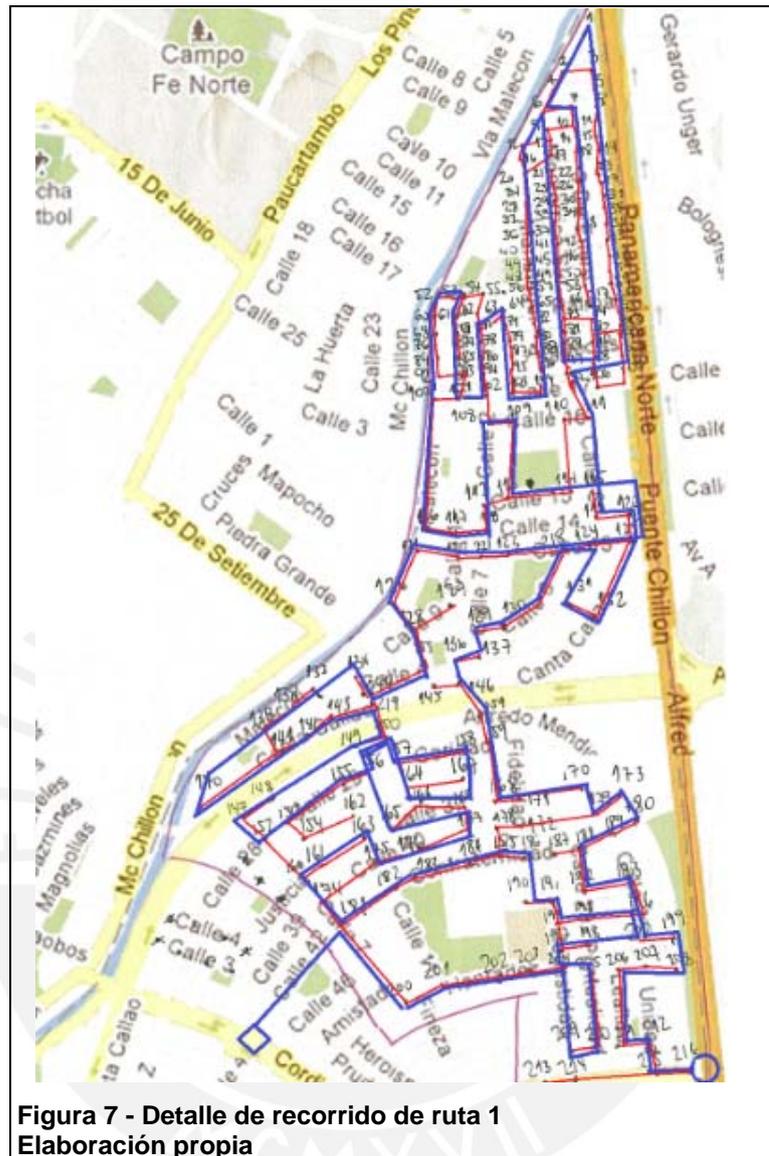
Como propuesta, se definieron rutas empíricas a partir de la solución del modelo, con la premisa de que recorran la mayoría de arcos de la solución propuesta. Esta definición se basa en cuatro principios:

- El primero es utilizar la solución en LINGO como la base para definir los caminos más cortos. Entre dos rutas, siempre se podrá tomar como preferente el camino obtenido en LINGO por ser este el modelo que define los caminos más cortos.
- Debido a que esta solución en LINGO es parcial y no brinda un camino definido, el segundo principio será el de utilizar la experiencia de los choferes de rutas para definir el camino más apropiado para seguir, tomando en cuenta facilidad de la ruta y caminos disponibles para el libre tránsito.
- El tercer principio es el de utilizar las direcciones de las avenidas disponibles en Google Maps, este caso se aplica principalmente a avenidas Principales. Debido a que la Municipalidad brinda posibilidad a los camiones de basura de poder transitar contra el tráfico de calles privadas, se intentará minimizar este tema junto con el experto, pero no será de vital importancia. Por esta razón tampoco está mapeado dentro del modelo.

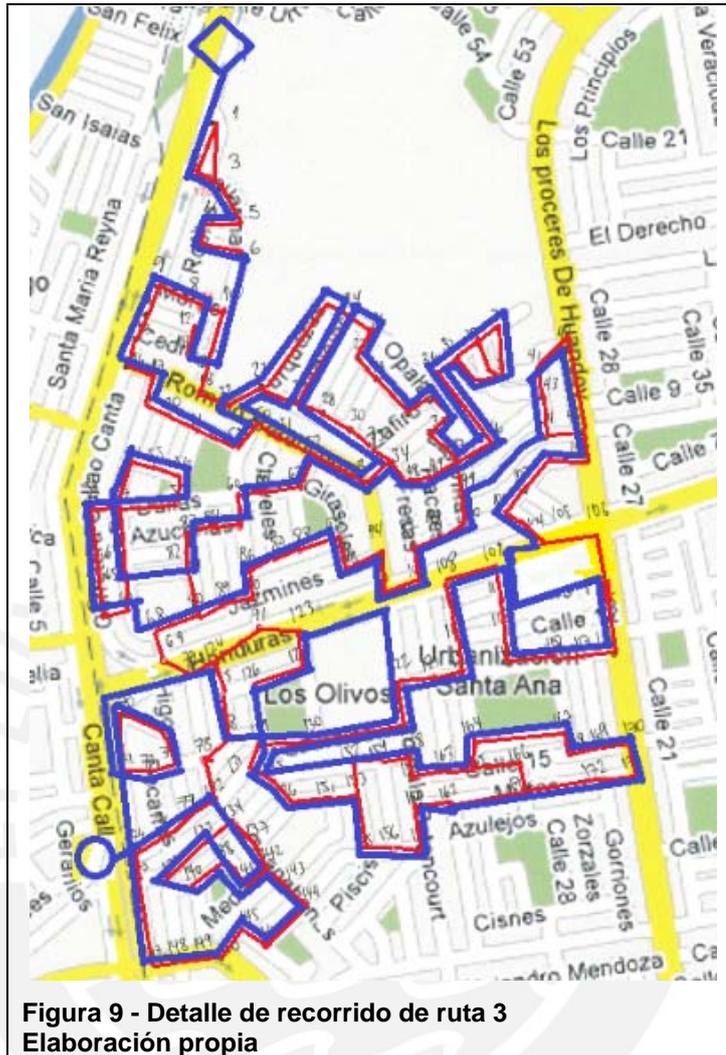
- El último principio es que los inicios y finales de ruta sean en avenidas principales. Esto debido a que brindará menor dificultad para repetir caminos recorridos y para regresar a la Base, debido a que las avenidas principales permiten la rápida ubicación y traslado de los vehículos, a diferencia de las calles residenciales. Además, la salida del camión sería más complicada, debido a las restricciones de rejas, estacionamiento de vehículos y velocidad para vías residenciales.

En cuanto a la leyenda, los arcos rojos son los considerados como obligatorios por el modelo. Los arcos azules son el camino propuesto en base al modelo y a la agrupación de subgrupos. El inicio del camino es señalado con un círculo y el final con un rombo.





Para la ruta 1, el recorrido inicia en una avenida principal, la avenida Próceres de Huandoy. Al iniciar, recorre las cuadras cercanas al Puente Chillón, hasta cruzar la avenida Canta Callao. Al cruzar, se propone que el camión siga cercano al Puente Chillón y que se recoja la basura de las pequeñas calles procurando un avance transversal, pues la uniformidad de las calles lo permite. En el camino de regreso, se recoge la basura de las calles del otro lado, para evitar repetir los caminos, y poder tener mapeada y limpia toda la zona. La salida es por la avenida de La Cordialidad, cerca al cruce con Próceres de Huandoy.



Para la ruta 3, el camión ingresa por la avenida Canta Callao y recoge todas las calles iniciales en forma circular, para salir por la avenida Honduras y Subir. El motivo de esto es para no cruzar por la mayoría de avenidas que la solución propuesta evita. Luego de ingresar por la avenida Honduras, cruza todas las avenidas del modelo, y vuelve a salir por Honduras para cruzar hacia el otro lado de la avenida. El camino cruza la mayoría de las avenidas propuestas por el modelo, y sale finalmente por la avenida Canta Callao.

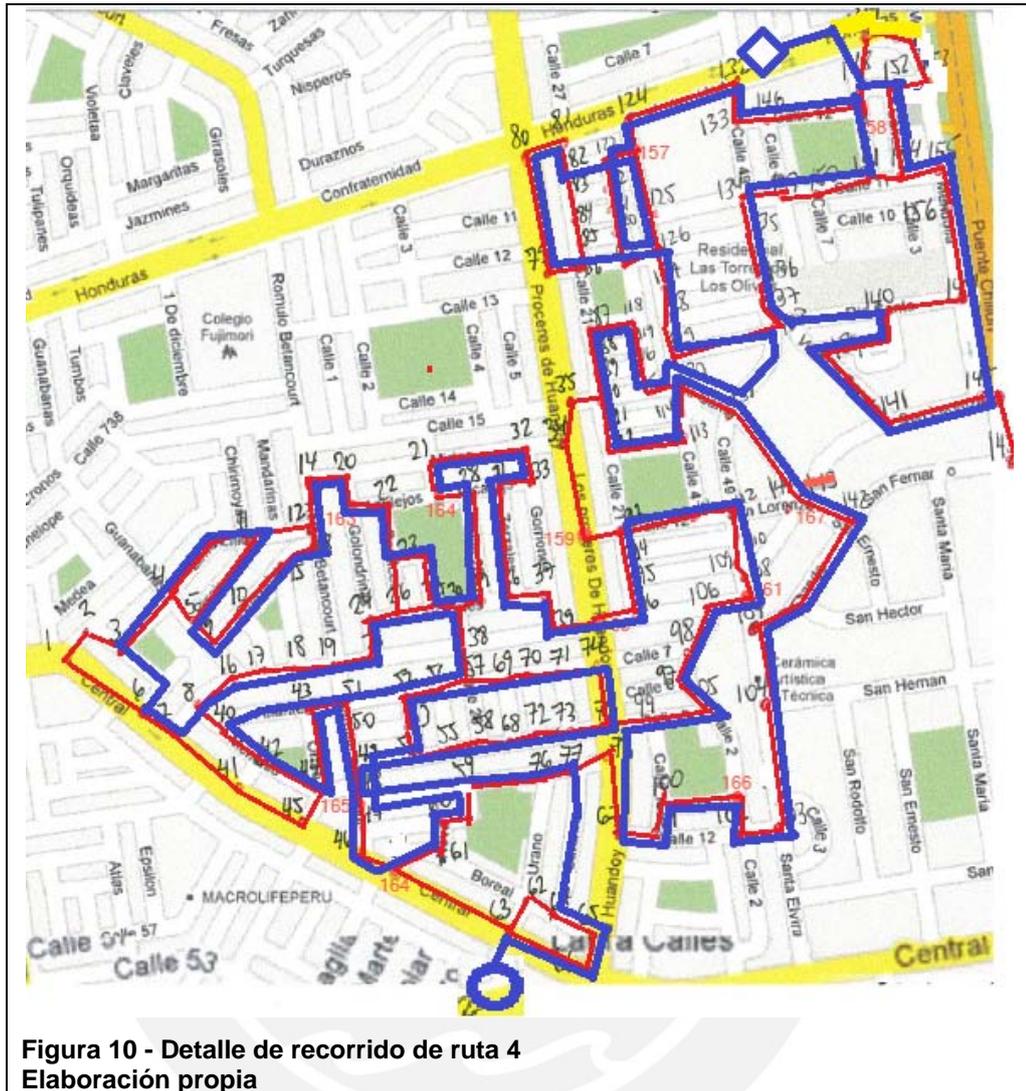


Figura 10 - Detalle de recorrido de ruta 4
Elaboración propia

Para el mapa 4, el camión ingresa por la carretera Central cruce con Próceres de Huandoy. Ingresa al lado izquierdo de Próceres y recorre el modelo propuesto en su mayoría. Las calles por las que no cruza son recogidas mediante puntos de acopio y a mano. Al cruzar hacia el lado derecho, el recorrido mantiene también el mismo recorrido alineado al modelo que el otro, y sale por la avenida de la Confraternidad o avenida Honduras.

Existe una mayor variación con respecto al modelo inicial, debido a que este mapa cuenta con distancias entre esquinas bastante largas, y lo que se busca es minimizar el recojo manual y centros de acopio de más en estos puntos, debido a los volúmenes que se asumen.



Figura 12 - Detalle de recorrido de ruta 6
Elaboración propia

Con respecto a la ruta 6, este inicia bordando el parque de Naranjal Primera Etapa, y luego ingresando por la avenida las Palmeras a una zona residencial. Mientras recorre esta ruta, existirá un apoyo manual por parte de los recogedores y los puntos de acopio, lo cual agilizará el proceso y brindará un soporte para el camión. Luego cruza la avenida Marañón y recoge las calles con la misma modalidad. Luego regresa a recoger la parte faltante antes de cruzar Marañón y sale por esta avenida también.



Para la ruta 7 se propone un barrido transversal, debido a que el mapa no es lo suficientemente ancho como para crear un camino de retorno y regresar al mismo punto de partida. El camión inicia su ruta cerca a la Panamericana Norte, y luego siguiendo con los métodos siempre utilizados, cruza la avenida universitaria e ingresa a

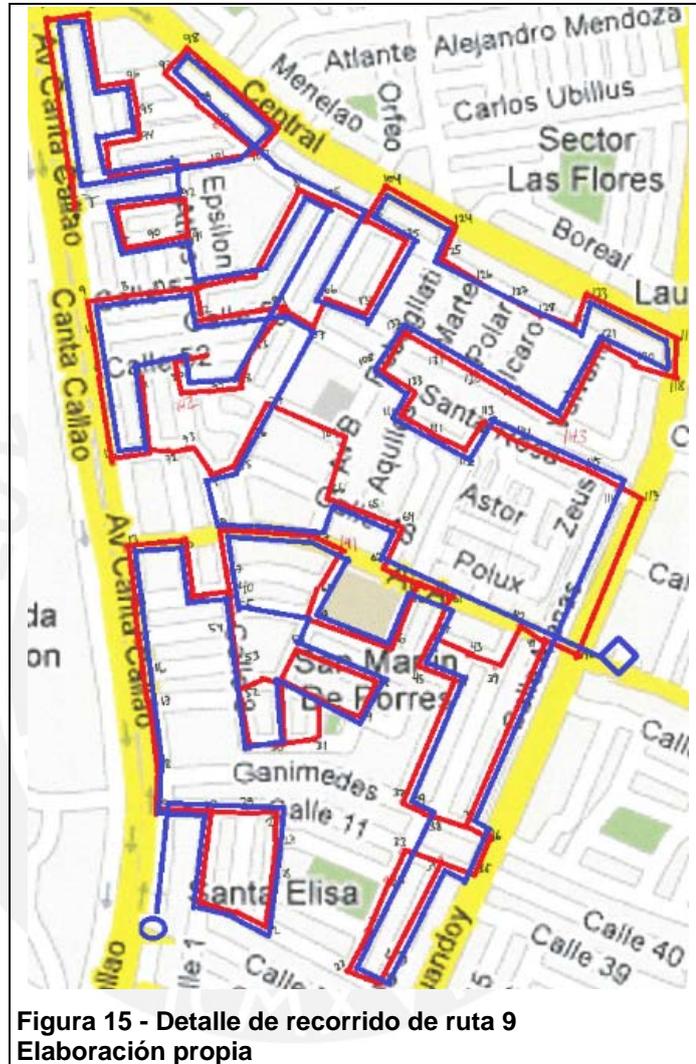
una nueva urbanización. Aquí sigue el principio de cruce trasversal, además de seguir en su mayoría el modelo propuesto. Así cruza la avenida Marañón, donde sí realiza un avance perimétrico debido a que el número de calles y modelo propuesto así lo permiten. El camión recolector sale por la avenida Marañón.



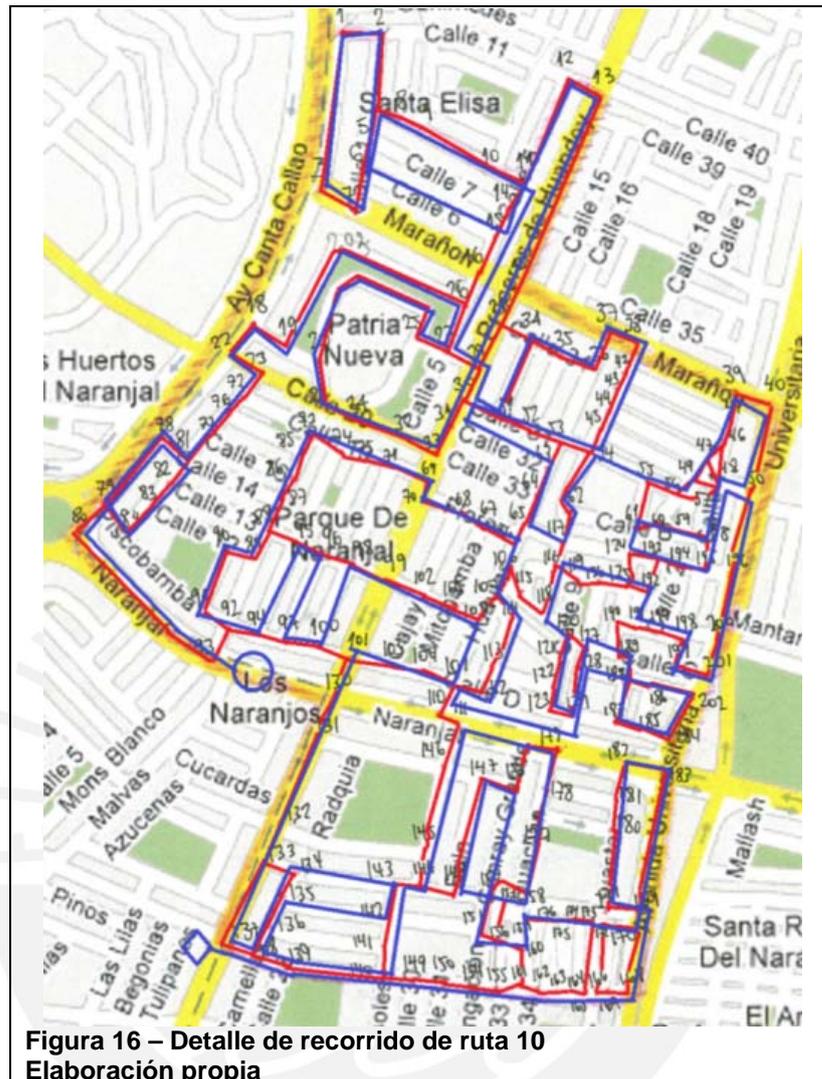
Figura 14 - Detalle de recorrido de ruta 8
 Elaboración propia

El ingreso respecto a la ruta 8 se da por la avenida Marañón, donde el bus recorre en gran semejanza con el modelo propuesto, y se apoya con los recolectores de basura. El camino cruza por bloques tres zonas ubicadas entre Próceres de Huandoy y Universitaria; una dividida por la Calle 40 y las otras dos otra por la avenida A. El objetivo de esta separación es recorrer los caminos perimétricamente. Luego el bus sale por la avenida Central y dobla en Próceres de Huandoy, para así ingresar a un

pequeño número de calles a recoger basura. Sale por la avenida A y finaliza el recorrido.



La ruta 9 se inicia por la avenida Canta, se ingresa a la urbanización Santa Elisa únicamente a recoger un par de cuadras y luego bordea el mapa, para volver a ingresar más adelante, a la altura de la avenida A. En este segundo recorrido se recoge todo lo restante de esta zona, mediante el apoyo de los recolectores de basura y los centros de acopio. Cruza la avenida A por la calle Atenas, e ingresa al segundo bloque a recoger. Para este camino, prima la recolección siguiendo el modelo, y también se cuenta con apoyo de centros de acopio y recolectores.



Para la ruta 10, esta inicia por el Naranjal, recoge y dobla a la avenida Canta Callao, por esta parte del camino, el método de recolección será el de puntos de acopio y apoyo con los recolectores. Cruza la calle 30 e ingresa a Patria Nueva, donde realiza la misma metodología de respetar el camino propuesto y el apoyo. Luego de ello sale por la avenida Próceres de Huandoy e ingresa a recoger una tercera zona. Al salir de esta zona, cruza Huandoy para recoger la cuarta zona de esta ruta, en la cual debido a las numerosas calles no sigue un camino lineal sino adapta el modelo a su recorrido, con el objetivo de crear un camino con el menor número de repeticiones por calle. El camión sale por la avenida Naranjal y por la avenida Los Próceres, ingresa a la quinta y última zona del mapa. Recoge toda la basura y sale por la misma avenida Próceres.



Figura 17 - Detalle de recorrido de ruta 11
Elaboración propia

La ruta 11 cuenta con una primera parte en la que busca semejar el camino propuesto por la solución, intentando además recorrer todas las calles, debido a que la angostura del camino no le permitiría volver o haría que repita recorridos en caso proponga un

camino más transversal. Al cruzar la avenida Universitaria ingresa en un camino de varias calles, por lo que en esta parte lo que se busca es recorrer el modelo, pero teniendo cierta holgura debido a que las cortas distancias entre calles lo permiten. Finalmente el vehículo termina su recorrido en una avenida principal.

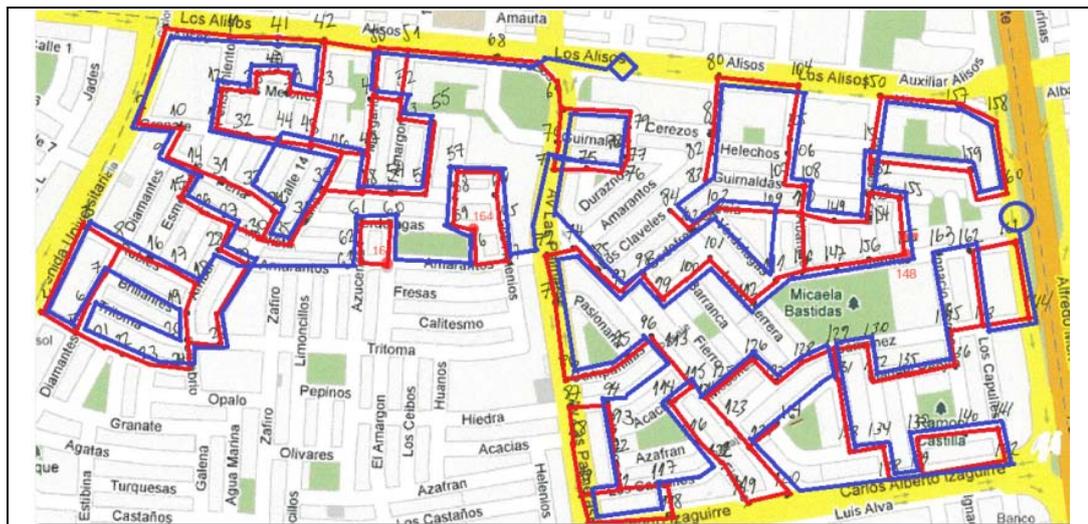


Figura 18 - Detalle de recorrido de ruta 12
Elaboración propia

Para la ruta 12, se tendrá bastante enfoque en el apoyo de los recolectores, debido a que existen bastantes intersecciones debido al dimensionamiento de las calles, y la solución hallada en el modelo propone recorrer el camino dejando varias cuadras sin ingresar. Para esto, se cuenta con el apoyo de distribución entre los recolectores y también fomentar los centros de acopio entre las calles.

El camión ingresa a una zona residencial, donde procura seguir el camino propuesto por el modelo. Sale por Carlos Izaguirre para no repetir el recorrido de las avenidas y recoger lo que el camión recogedor de avenidas aún no ha hecho, al regresar mantiene un recorrido apoyado por los recogedores hasta que sale por la avenida Las Palmeras para ingresar a una segunda zona de calles irregulares también. En esta zona, el camión procura mantener el recorrido que ha propuesto el modelo, hasta cruzar finalmente Las Palmeras e ingresar a la tercera zona de esta ruta. En esta, la similitud con el camino propuesto por el modelo es bastante, pero sí cuenta con apoyo con los recogedores y centros de acopio en varias partes del recorrido.

La solución propuesta para esta ruta culmina cerca al cruce de la avenida los Alisos cruce con Las Palmeras. Esto le permite poder tener varias alternativas para regresar a su base.



La ruta 13 inicia ingresando por Las Palmeras. Para este recorrido, inicialmente el camión utilizar el apoyo de los recolectores de basura y los centros de acopio. Luego de realizar la recolección en la primera parte, el camión cruza la avenida Carlos Alberto Izaguirre para ingresar a la segunda zona. En esta parte realiza un recorrido similar al anterior, buscando similar el camino del modelo propuesto. Luego de culminar esta segunda zona, regresa por la avenida Alberto Carlos Izaguirre a la anterior, con el objetivo de finalizar la ruta.

Para esta última parte, se apoya de la misma manera de los recolectores y centros de acopio, para así terminar por la avenida Universitaria, cerca al cruce con la avenida

Izaguirre. Esto genera una ventaja para el camión debido a que puede seleccionar varias rutas de salida hacia la base.

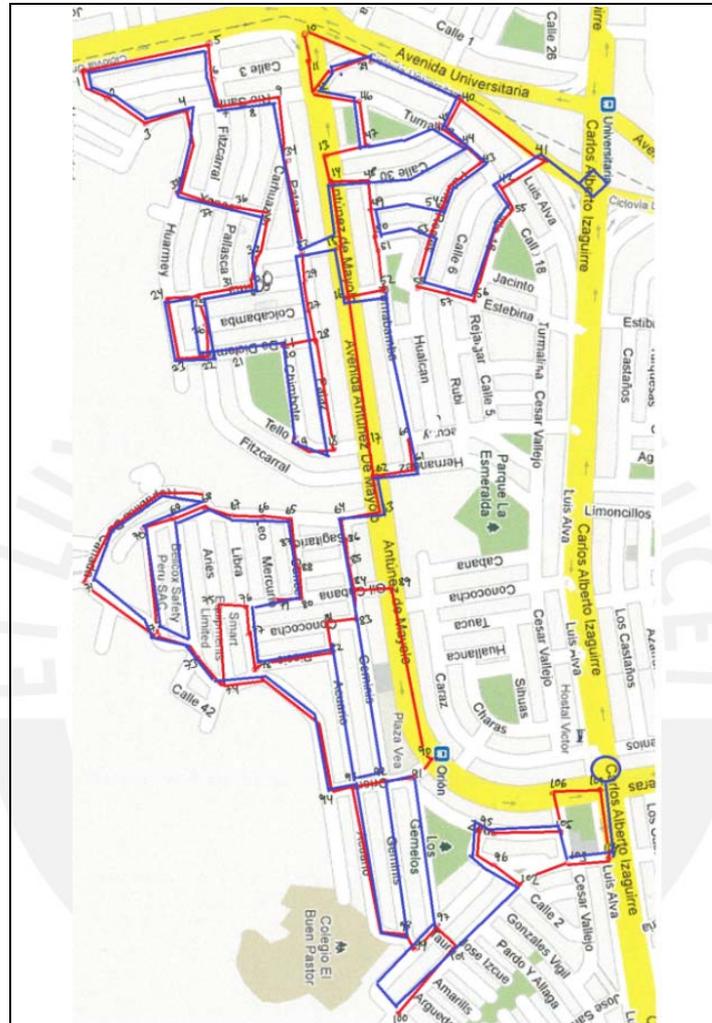


Figura 20 – Detalle de recorrido de ruta 14
Elaboración propia

La ruta 14 inicia por la avenida Carlos Izaguirre, bordeando un parque y luego ingresa a las primeras calles. En esta parte en particular, el camión busca cruzar todas las zonas debido a que estas son cuadras largas, luego mientras continúa su recorrido y las calles son más cortas y en las faldas de un cerro, se puede usar el método de centros de acopio y apoyo en los recogedores de basura.

El camión al finalizar esta primera parte, avanza por la avenida Antúnez de Mayolo para ingresar a una segunda zona en las faldas de un cerro, la cual cuenta también con el apoyo de los recolectores y centros de acopio.

Al terminar esta segunda parte, cruza Antúnez de Mayolo para ingresar a una tercera zona, donde además de similar el recorrido del modelo, intenta recorrer todas las calles debido a que es una zona con distancias prolongadas. El recorrido culmina en la avenida Carlos Izaguirre, cerca al cruce con Universitaria.

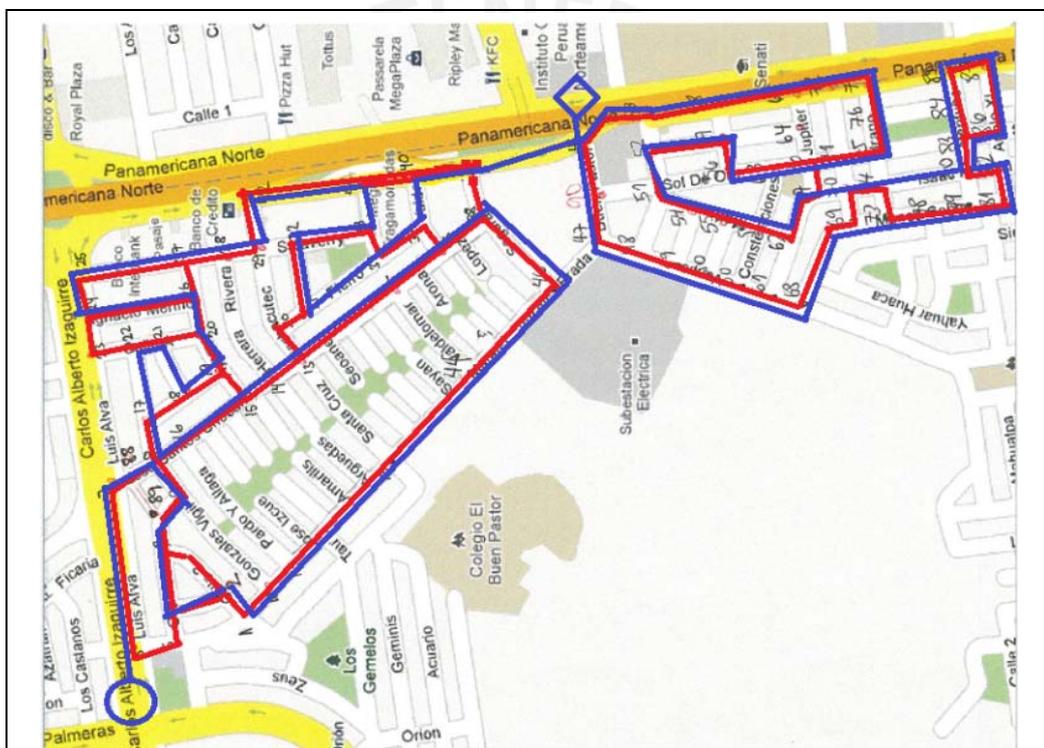


Figura 21– Detalle de recorrido de ruta 15
Elaboración propia

Para la ruta 15, el camión ingresa por la avenida Carlos Alberto Izaguirre, al ingresar utilizará en gran medida el método de los centros de acopio y apoyo en los recogedores de basura, debido a que la zona inicial genera mucho reproceso al tener que ingresar el camión y retroceder el camino. Luego de culminar el recojo en esta parte, el camión continúa el recorrido con las partes faltantes y manteniendo la misma dinámica, cruza parte de la Panamericana Norte para ingresar a una segunda parte. En

este lado, el camión mantendrá un recorrido muy similar al propuesto en la solución con el apoyo de los recogedores. Para finalizar el camión sale por la Panamericana Norte.

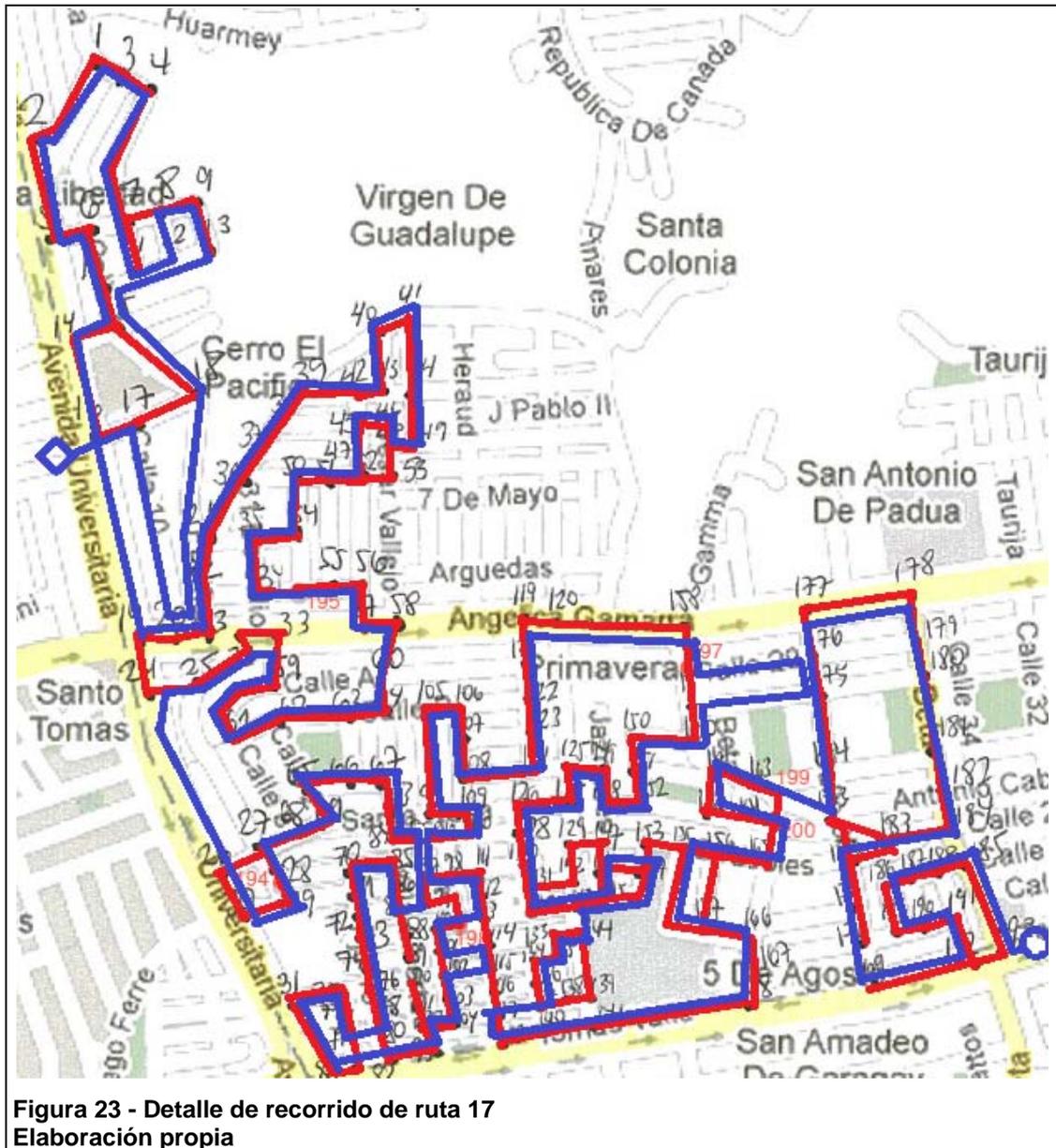


Figura 22 – Detalle de recorrido de ruta 16
Elaboración propia

Para la ruta 16, el camión ingresa por la avenida Angélica Gamarra. En esta primera parte el camión sigue casi fielmente el camino propuesto por la solución del modelo, pero se contará con el apoyo de centros de acopio y recolectores debido a las calles por las que no cruza. Luego de culminar esta primera parte, el camión avanza por Angélica Gamarra hacia una segunda zona, donde mantiene una fidelidad hacia el recorrido propuesto pero también se procura recorrer la mayoría de calles para minimizar el apoyo de los recogedores en estas calles largas. El recorrido del camión finaliza en la Panamericana Norte.

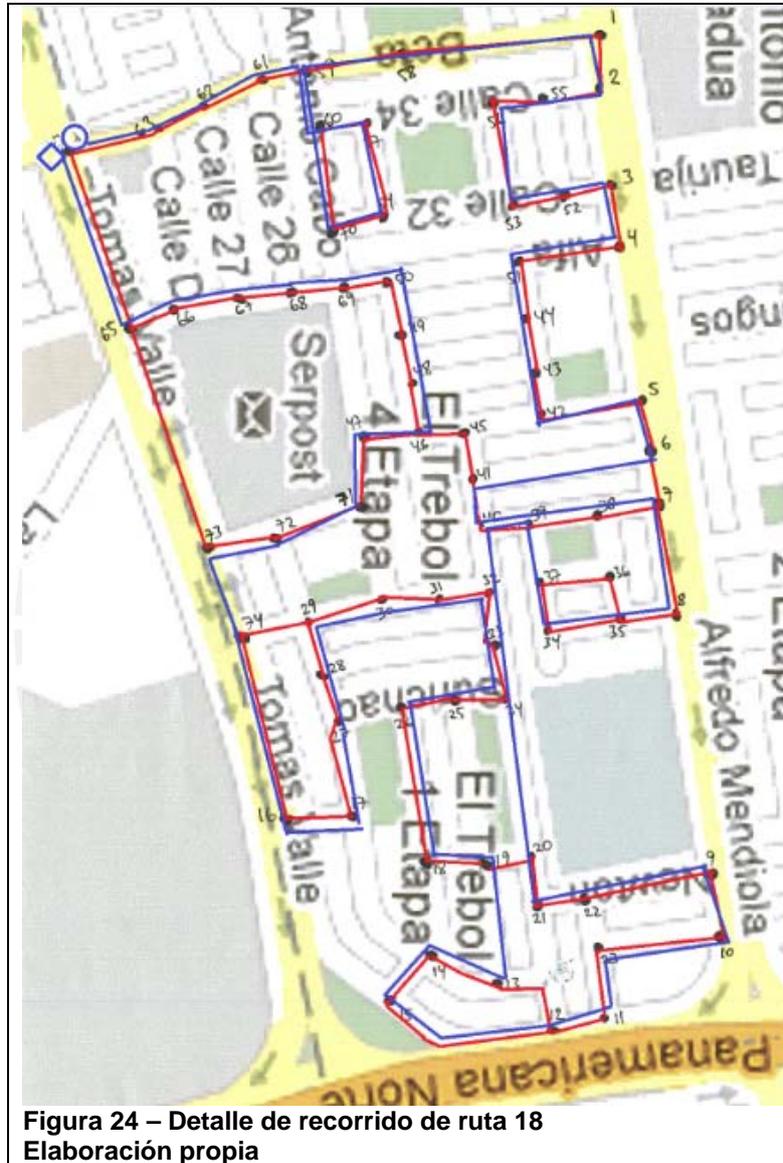
Para la ruta 17, el camión ingresará por la avenida Tomás Valle, y cruzará inicialmente la urbanización con el apoyo de los recogedores de basura. Existe, sin embargo bastante complejidad en la siguiente parte del recorrido debido a que las calles son pequeñas e irregulares lo cual no permite un recorrido uniforme, y al igual que en el mapa 11, genera una solución discontinua. La ventaja de utilizar esta ruta como base es que se podrá prever un mejor recorrido del camino en apoyo con la Municipalidad, y así lograr minimizar riesgos de vehículos que impidan el paso o rejas cerradas.

Luego de culminar esta parte, el camión cruza Angélica Gamarra para finalizar el recorrido casi total de las calles de esta parte, y finalmente culminar el recojo de la ruta en la avenida Universitaria.



La ruta 18 es una de las más pequeñas, además de no tener cruces entre avenidas, sino que se trata de sólo una urbanización. Este recorrido inicia en la avenida Beta, donde ingresa el recorrido y luego sale e ingresa por la avenida Alfredo Mendiola,

mientras los recogedores apoyan así como también los puntos de acopio. Esta técnica se mantiene durante el recorrido de toda la ruta, hasta finalmente culminar en el mismo punto de ingreso, el cruce de la avenida Beta con Tomás Valle.



Como se puede observar en los mapas, las rutas obedecen a distancias distintas a las de la solución del modelo, esto debido a los ajustes, sin embargo no guardan mucha diferencia entre ellas. Como resumen, la tabla 8 muestra las distancias recorridas y el tiempo estimado del recorrido, en base a una velocidad constante del vehículo de 7 km/h y un 20% de tiempos adicionales debido en paradas de grande recojo de basura

o imprevistos. Aunque sean rutas de similar volumen de recojo de residuos sólidos, no todas tienen la misma complejidad en cuanto a la solución. Como se puede apreciar en la tabla 9, las rutas 11 y 17 son las dos rutas que cuentan con más número de arcos dentro del mapa, debido a que tienen numerosos puntos con tres arcos como opción de salida. Debido a la complejidad que manejan, se utilizará un porcentaje del 30% de incremento por paradas, 10% más que las otras rutas.

Tabla 8 – Relación de tiempos estimados de recorrido de nuevas rutas

Ruta	Distancia ajustada (Km)	Velocidad prom. (Km/h)	Tiempo (h)	Incremento por Paradas	Tiempo Total (h)
1	13.626	7	1.947	20%	2.336
2	12.218	7	1.745	20%	2.095
3	14.339	7	2.048	20%	2.458
4	12.799	7	1.828	20%	2.194
5	19.370	7	2.767	20%	3.321
6	9.532	7	1.362	20%	1.634
7	9.859	7	1.408	20%	1.690
8	14.963	7	2.138	20%	2.565
9	11.238	7	1.605	20%	1.927
10	17.586	7	2.512	20%	3.015
11	17.711	7	2.530	30%	3.289
12	12.950	7	1.850	20%	2.220
13	10.341	7	1.477	20%	1.773
14	10.930	7	1.561	20%	1.874
15	7.234	7	1.033	20%	1.240
16	8.475	7	1.211	20%	1.453
17	13.319	7	1.903	30%	2.474
18	5.392	7	0.770	20%	0.924
TOTAL					38.480

Elaboración propia

Tabla 9 - Número de arcos por ruta

Ruta	Nº arcos
1	300
2	236
3	269
4	253
5	148

Tabla 9 - Número de arcos por ruta

Ruta	N° arcos
6	124
7	152
8	197
9	208
10	313
11	358
12	251
13	208
14	151
15	133
16	178
17	316
18	111

Elaboración propia

A partir de las distancias calculadas en el modelo y de las ajustadas, ambas mostradas en la tabla 10, se realiza un análisis del coeficiente de variación para conocer la dispersión de los datos.

Tabla 10 – Diferencia entre distancia total del modelo y distancia ajustada

Ruta	Distancia ajustada x_j (Km)	Distancia modelo x_i (Km)	Δ $(x_i - x_j)$	CV $\frac{\Delta}{x_j}$
1	13.626	11.898	1.728	14.52%
2	12.218	11.238	0.98	8.72%
3	14.339	12.239	2.1	17.16%
4	12.799	12.580	0.219	1.74%
5	19.370	15.772	3.598	22.81%
6	9.532	8.423	1.109	13.17%
7	9.859	8.481	1.378	16.25%
8	14.963	11.485	3.478	30.28%
9	11.238	10.301	0.937	9.10%
10	17.586	21.754	4.168	19.16%
11	17.711	12.186	5.525	45.34%
12	12.950	11.346	1.604	14.14%

Tabla 10 – Diferencia entre distancia total del modelo y distancia ajustada

Ruta	Distancia ajustada x_i (Km)	Distancia modelo x_i (Km)	Δ $(x_1 - x_2)$	CV $\frac{\Delta}{x_1}$
13	10.341	9.943	0.398	4.00%
14	10.930	9.786	1.144	11.69%
15	7.234	6.713	0.521	7.76%
16	8.475	7.740	0.735	9.50%
17	13.319	12.583	0.736	5.85%
18	5.392	5.759	0.367	6.37%
PROMEDIO			21.580	14.3%

Elaboración propia

El coeficiente de variación promedio para los 18 mapas es de 14.3%. Según Esperanza García en el documento “Análisis descriptivo de variables cuantitativas”, un coeficiente menor al 10% es símbolo de poca dispersión de los datos y hasta 33% es aceptable. Esto confirma el hecho de que las nuevas rutas tienen variabilidad aceptable menor al 33% en la mayoría de casos y sirven como un ajuste que no modifica en demasía las rutas.

Si bien casi todos los mapas responden a un nivel a lo mucho aceptable, existen algunos coeficientes que varían en mayor nivel. A continuación se explicarán los motivos para tal diferencia en los casos con mayor variación: el 8 y el 11.

Para el mapa 8, como se mencionó anteriormente, el mapa cuenta con tramos bastante largos entre esquinas, y lo que se busca es minimizar el trabajo de recogedores y creación de puntos de acopio; pues dado el volumen que se recogería en estos tramos largos, el esfuerzo podría crecer exponencialmente.

El mapa 11 es un caso especial, pues debido al número de variables y caminos posibles, los valores en el modelo asumen distancias parciales y minimizan el resultado. Sin embargo, tomando las distancias reales en el modelo y asignándoles un valor entero, el resultado sería similar al del camino propuesto, con menor coeficiente de variación.

Entonces, se puede deducir de lo anterior que los caminos propuestos en coordinación con el experto responden a las necesidades de campo, pero si guardan relación relevante con los datos propuestos por el modelo.

Finalmente, como validación pendiente se tenía el hecho de que los caminos duren menos de 3 horas. Se revisa entonces en la tabla 11 los resultados hallados por el modelo, para confirmar que ninguno se encuentre dentro de un número cercano a las 3 horas.

Tabla 11 – Tiempos estimados de los modelos

Ruta	Distancia modelo (Km)	Velocidad prom. (Km/h)	Tiempo (h)
1	11.898	7	1.700
2	11.238	7	1.605
3	12.239	7	1.748
4	12.580	7	1.797
5	15.772	7	2.253
6	8.423	7	1.203
7	8.481	7	1.212
8	11.485	7	1.641
9	10.301	7	1.472
10	21.754	7	3.108
11	12.186	7	1.741
12	11.346	7	1.621
13	9.943	7	1.420
14	9.786	7	1.398
15	6.713	7	0.959
16	7.740	7	1.106
17	12.583	7	1.798
18	5.759	7	0.823
PROMEDIO			1.589

Elaboración propia

Se puede observar como todas las rutas obedecen a tiempos menores a 4 horas, siendo el mayor la ruta 10, la cual toma un recorrido de 3 horas y 6 minutos aproximadamente. Esto confirma que la restricción de distancia menor a 4 horas no afecta alguna solución dentro de este conjunto solución.

3.3 Beneficios cualitativos y amenazas

Es importante comentar los beneficios y amenazas debido a que pese que influyen en el flujo de caja, impactan a los involucrados y pueden culminar tanto en ganancias como en pérdidas derivadas del proyecto, a un largo plazo.

3.3.1 Beneficios cualitativos

Con respecto a los beneficios cualitativos, el primero es el mayor control de las rutas. Esto permite responder más efectivamente a los cambios, hacer simulaciones de rutas, y decidir qué alternativas posibles pueden generarse a partir de nuevas restricciones que aparezcan en la práctica, pues ya se tiene la base de datos actual y la formulación del modelo para actualizaciones futuras.

Otro beneficio cualitativo es el aumento de satisfacción de los habitantes del distrito, en la medida en que tengan un mejor reconocimiento de los horarios de la empresa, y puedan crearse hábitos de despacho de basura de sus hogares. De esta manera la empresa genera una mejor imagen, y la Municipalidad también se siente satisfecha con los resultados, prometiendo una alianza por más tiempo.

3.3.2 Amenazas internas y externas

Una de las amenazas externas más importantes es que los pobladores no acaten las nuevas instrucciones relacionadas con el cambio de rutas. Para esto, se tiene que trabajar de la mano de la municipalidad para gestionar el cambio y adaptar a la población. Otra de las amenazas externos es que no se continúe con la concesión con la empresa, la cual según el Plan Distrital de Manejo de Residuos Sólidos, culmina en el 2014, abierto a la renovación por 5 años más. Por este motivo, se debe trabajar en conjunto con la Municipalidad para mantener el contrato.

Por último, con respecto a las amenazas internas, una importante es que los trabajadores no se acostumbren al nuevo trabajo. Para esto se coordinará con Recursos Humanos para la respectiva capacitación y las técnicas de retención de personal.



CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN ECONÓMICA

El siguiente capítulo presenta la evaluación económica y financiera del proyecto, con el fin de conocer la rentabilidad del proyecto, y el mejor modelo de financiamiento.

Para ello, se utiliza como guía los lineamientos del texto “Evaluación estratégica de proyectos de inversión” de Folke Kafka. Se iniciará con el análisis de la operación del proyecto. Con la información anterior compilada, se prepararán los flujos de caja del proyecto y finalmente, el análisis de sensibilidad.

4.1 Análisis de la operación

Para empezar a conocer la rentabilidad del negocio, es necesario iniciar con el análisis de los drivers que impactan el flujo de caja del proyecto.

Se considera que durante el primer año, teniendo en cuenta el poco tiempo de implementado el proyecto en el año, las capacitaciones y la curva de aprendizaje, se contabilizará para efectos del modelo un impacto de 70% respecto a los beneficios totales para un año.

4.1.1 Ingresos

Los ingresos hacen referencia a los beneficios generados por la implementación del proyecto.

a. Ahorro en capacidad ociosa

Con base en los nuevos mapas, se obtiene una capacidad ociosa para los camiones que se programaban a recoger la basura, 8 horas uno (2 rutas) y 4 hora el otro (1 ruta). Tomando en cuenta el alquiler del camión a S/. 100 la hora y que los camiones cuentan con 12 horas disponibles en total por día, y 30 días al mes, se obtuvo una oportunidad de ganancia de S/. 36,000 mensuales. Debido a que se procura un escenario realista, se acordó con un experto utilizar un factor de impacto de 80% para las horas alquiladas. Con estas condiciones, al año, se genera un ahorro de S/. 345,600 en reducción de camiones, como se encuentra detallado en la tabla 12. Para el primer año, debido a la restricción del impacto de 70% y la inflación del año 0, se asumirá S/. 246,758. También se acordó mantener la vida útil de los dos camiones alquilados por 10 años a partir del inicio del proyecto.

Tabla 12 - Ingresos por alquiler de vehículos con capacidad ociosa

(S/.)	Ejemplo de ruta	Rutas a reducir
Nº rutas	1	3
Nº horas	4	12
Alquiler/hora	100	100
Alquiler/día	400	1,200
Alquiler/mes	12,000	36,000
Ajuste	80%	80%
Alquiler real/mes	9,600	28,800
Alquiler real/año	115,200	345,600
Impacto año 1	70%	70%
Inflación año 1	2%	2%
Alquiler real/año - año 1	82,253	246,758

Elaboración propia

b. Ahorro en mano de obra

Los vehículos no utilizados contaban con personal de planilla asignado a este fin. Estos trabajadores en teoría serían desvinculados de la empresa o trasladados a otros puestos en los que se necesite su trabajo. Sin embargo para efectos del proyecto, estos puestos significarían un beneficio, debido a la mejor asignación de vehículos a rutas, contando con los tiempos y esfuerzo disponibles. Como se puede apreciar en la tabla 13, la evitación de pagos a estos trabajadores generan un ahorro anual de S/.

204,226 y para el primer año, debido al impacto de 70% y la inflación, el número considerado para el flujo de caja es S/. 145,817. Se utiliza una proporcionalidad del sueldo mensual de esta fuerza de operación, con los descuentos legales y administrativos respectivos.

Tabla 13 – Ahorro por reducción de mano de obra

(S/.)	Recogedor	Chofer	TOTAL
Nº Trabajadores/turno	3	1	4
Nº turnos	3	3	3
Nº Trabajadores	9	3	12
Pago unitario/turno	15	25	
Pago total/día	405	225	630
Nº Días/mes	30	30	
Pago mensual	12,150	6,750	18,900
Nº Sueldos al año	14	14	14
Pago anual bruto	170,100	94,500	264,600
AFP (12.94%)¹³	(22,045)	(12,247)	(34,292)
ESSALUD (9%)	(15,309)	(8,505)	(23,814)
5ta Categoría (1%)	(1,458)	(810)	(2,268)
Pago anual neto	131,288	72,938	204,226
Impacto año 1	70%	70%	70%
Inflación año 1	2%	2%	2%
Pago anual neto – año 1	93,740	52,078	145,817

Elaboración propia

c. Ahorro en gasolina por Optimización de Ruta

Para encontrar el ahorro en la Optimización, se toma como base la distancia recorrida en total por las rutas anteriores, y se compara con la actual. Este ejercicio se puede apreciar en la tabla 14. Las distancias de las rutas anteriores se calcularon a partir del histórico de la tabla 2, con información histórica del 2012, a Setiembre. Así se tiene una reducción de 26 horas y 47 minutos, aproximadamente 41% menos tiempo que el recorrido total anterior. Esta reducción de horas es diaria.

¹³ AFP Horizonte. Fondo Privado de Pensiones
<<http://www.integra.com.pe/wps/wcm/connect/websiteintegra/es/sispriv/>>

Tabla 14 - Tiempos de recorrido de rutas
(hrs)

Tiempo anterior	64:59:51
Tiempo actual	38:29:45
Tiempo reducido	26:30:06
Reducción	40.8%

Elaboración propia

Para mantener un escenario moderado, se tomó la decisión para este punto de únicamente considerar una reducción de 20% en el recorrido. Esto debido a que primero, dada la reducción actual teórica, el 20% propuesto es una meta posible, y segundo que la empresa prefiere minimizar la implementación de desgaste de trabajadores y puntos de acopio, por lo que los objetivos serán alinearse a la reducción del 20% del recorrido y tomar los tiempos de holgura para disminuir los esfuerzos y puntos de acopio necesarios para conseguir los tiempos del nuevo modelo. Por tal motivo, el flujo de caja únicamente presentará la reducción del 20% en la distancia total.

Respecto a la cuantificación de esta diferencia, se utiliza el precio de combustible. La razón de galón de combustible por kilómetro usada será de 8 kilómetros por galón, según lo comentado por un experto. El costo de combustible de 90 octanos, según la visita a una estación en Los Olivos, es de 13.50 soles aproximadamente por galón, con fecha de visita en de noviembre 2012. Como se puede apreciar en la tabla 15, se concluye que el ahorro cuantificado anual es de S/.55,248.48 y para el año 1, considerando el impacto de 70% y la inflación, S/. 39,447.41.

Tabla 15 - Ingresos por reducción de gastos de gasolina

(S/.)

Ahorro diario (h)	26.47
Ahorro ajustado (h)	12.992
Velocidad promedio (km/h)	7
Ahorro diario (km)	90.94
Rendimiento (km/gal)	8

Tabla 15 - Ingresos por reducción de gastos de gasolina

(S/.)

Gal ahorrados al día	11.37
Costo Galón 90 octanos	13.50
Ahorro diario	153.47
Ahorro anual	55,248.48
Impacto año 1	70%
Inflación año 1	2%
Ahorro anual – año 1	39,447.41

Elaboración propia

4.1.2 Egresos

a. Costos por elaboración de la propuesta

El tiempo de trabajo estimado para la propuesta fue de 4 meses a tiempo completo. Se estiman los costos de un alumno asignado al proyecto más el costo de los cursos de Tesis como asesoría. Además, se considerará el contrato temporal por 4 meses de un asistente de reemplazo para asignar un experto de la empresa a apoyar al proyecto. También se agregarán costos de servicios y materiales por S/. 10,000. En la tabla 16 se aprecia el detalle de los costos y se mapea un gasto total es de S/. 22,876.

Tabla 16 – Costos de personal asignado al proyecto

(S/.)

Costo mensual del asignado	1,000
Meses de asignado	4
Costo total del asignado	4,000
Costo de los cursos de Tesis	2,786
Asistente de reemplazo	1,500
Meses de asistente	4
Costo total del reemplazo	6,000
Costos de materiales y servicios	10,000
Total	22,786

Elaboración propia

b. Costos de penalización por incumplimiento de contrato

Dentro del cambio analizado, se cuenta con que los costos de incumplimiento del contrato puedan ejercerse por parte de la Municipalidad. Aunque este es un escenario que no especifica un incumplimiento de contrato, el hecho de modificar las rutas podría llevar a la penalidad expresada en el contrato. El costo esperado de penalización es de S/. 600,000, que responde a aproximadamente 10% del valor del contrato y será considerado en el año cero para el flujo de caja.

c. Costos de indemnización por despido

Un costo relevante debido a los trabajadores en planilla es el costo de indemnización por despido. El tiempo máximo que actualmente tienen los trabajadores de recolección de basura es 1 año, por tal motivo como escenario pesimista se considera como un año el tiempo que los potenciales trabajadores ingresen a la empresa. De esta manera, como se puede apreciar en la tabla 17, el costo es de S/. 73,195.

Tabla 17 - Costos de indemnización por despido
(S/.)

CTS	18,900
Vacaciones truncas	18,900
Gratificaciones truncas	18,900
Indemnización por Despido (Ley N° 34 Constitución)	28,350
SUBTOTAL	85,050
Descuentos (23%)	(19,510)
Bonificación Ley 29351 (9%)	7,655
TOTAL	73,194

Elaboración propia

4.2 Flujos de caja del proyecto

Una vez calculados los beneficios y costos relacionados al proyecto, se utilizarán estos datos para insertarlos en los flujos de caja, y así evaluar la rentabilidad del proyecto mediante herramientas económicas y financieras.

4.2.1 Flujo de caja económico del proyecto

El primer flujo de caja es el económico, donde se utilizan los beneficios y costos mapeados en la sección anterior. Se pueden apreciar los resultados para los diez años, tiempo considerado como horizonte del proyecto, en la tabla 18. Se tienen los supuestos de tipo de cambio y porcentaje de inflación, basados en datos actuales y una estabilización en la economía nacional en los próximos años¹⁴¹⁵.

Con respecto a los costos e ingresos, estos serán proyectados en base al porcentaje de proyección propuesto. Con respecto a los ingresos y costos en dólares, estos serán proyectados utilizando el tipo de cambio del año donde se ejecuta el flujo de dinero y también el porcentaje de inflación correspondiente.

El impuesto general a las ventas (IGV) será aplicado a todos los ingresos y costos que no estén asociados al pago de sueldos o indemnizaciones a los trabajadores. Debido al fuerte desembolso inicial, el IGV de dicho año se tomará como ahorro fiscal para compensar el IGV de los siguientes años.

¹⁴ Banco Central de Reserva del Perú – Reporte de Inflación: Panorama actual y proyecciones macroeconómicas 2013-2014 (2013)

¹⁵<http://www.andina.com.pe/Espanol/noticia-bcr-peru-mantendra-perspectiva-favorable-crecimiento-proximos-anos-446812.aspx>

Tabla 18 - Flujo de caja económico del proyecto

(S/.)	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Tipo de cambio	2.55	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
% Inflación	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%
Impacto	-	70%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
INGRESOS	-	432,023	629,519	642,110	654,952	668,051	681,412	695,040	708,941	723,120	737,582
1. Alquiler camiones	-	246,758	359,562	366,753	374,089	381,570	389,202	396,986	404,925	413,024	421,284
2. Ahorro en MO	-	145,817	212,477	216,726	221,061	225,482	229,991	234,591	239,283	244,069	248,950
3. Reducción gasolina	-	39,447	57,481	58,630	59,803	60,999	62,219	63,463	64,732	66,027	67,348
COSTOS	(695,980)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1. Ejecución propuesta	(22,786)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2. Penalización por incumplimiento	(600,000)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3. Indemnizaciones	(73,194)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ahorro fiscal	109,800	58,283	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IGV			(16,785)	(76,569)	(78,100)	(79,662)	(81,256)	(82,881)	(84,538)	(86,229)	(87,954)
FLUJO DE CAJA ECONÓMICO	(695,980)	432,023	612,735	565,541	576,851	588,389	600,156	612,159	624,403	636,891	649,628

Elaboración propia

4.2.2 Financiamiento del proyecto

El perfil del inversionista es de riesgo medio. Prefiere escenarios en los que la inversión es compartida con un banco. Por ello, para el financiamiento se analizarán alternativas de financiamiento mediante capital propio, financiamiento de un banco grande y financiamiento de un banco mediano.

Dentro de las opciones de préstamo que ofrece un banco, no es posible el financiamiento debido a que los bancos no realizan préstamos para pagar sueldos de personal, liquidaciones, o penalizaciones de contrato. Además, la empresa cuenta con ingresos mayores a 2 millones de dólares anuales, debido a los contratos con las municipalidades. Por tales motivos se concluye que sólo será válido utilizar capital propio y se asumirá que la empresa sí cuenta con fondos suficientes para la inversión.

4.3 Evaluación financiera

Debido a que la inversión se realizará mediante capital propio, el flujo financiero es el mismo que el flujo económico. Luego de ello se realiza la evaluación para conocer si el proyecto es rentable o no. Primero se calcula el costo ponderado de capital mediante los principios del modelo de valoración costo de capital CAPM. Luego, se halla la tasa interna de retorno del proyecto, y en base al costo ponderado de capital se calcula el valor presente neto.

4.3.1 Costo ponderado de capital (WACC)

A partir de la decisión de inversión mediante capital propio, se utilizan los principios del CAPM para definir la tasa interna de retorno del sector de Recolección de Residuos Sólidos. El modelo del CAPM relaciona el retorno requerido del patrimonio con la tasa

libre de riesgo y con riesgo sistémico frente al mercado. Como se explicó anteriormente, este proyecto se financiará completamente con capital propio $COKacc$.

La siguiente fórmula para el cálculo del costo de oportunidad de capital aplica cuando se habla de inversión privada únicamente:

$$COKacc = R_f + b(R_m - R_f) + RP$$

donde:

R_f : Tasa de libre riesgo

b : Volatilidad del sector

R_m : Rendimiento de mercado

$(R_m - R_f)$: Prima de mercado

RP : Riesgo país

Se tienen las siguientes condiciones:

R_f : 4.46%

Como tasa libre de riesgo se utilizará los bonos soberanos peruanos de maduración a largo plazo (10 años), porque corresponde a la moneda en la que se están generando los flujos

b : 0.83

La beta, que expresa la volatilidad del sector, esta será la propuesta por Damodaran¹⁶ para el sector transporte.

$(R_m - R_f)$: 9

¹⁶ Betas por sector para el cálculo del WACC - http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/Betas.html

La prima de Riesgo de mercado determina la rentabilidad esperada de una inversión diversificada por encima de una renta fija. Para este proyecto se empleará la prima de riesgo propuesta por Damodaran¹⁷.

RP : 1.17

El riesgo país, incluye factores políticos, sociales y económicos que determinan el riesgo de inversión en el país. Se tomó el riesgo país de Perú¹⁸.

A partir de estos datos se tiene que el **COKacc** es igual a 13.1%.

4.3.2 Evaluación económica

Luego de tener el flujo financiero, se halla la tasa interna de retorno, el valor presente neto y el número de años de recupero. El detalle se observa en la tabla 19.

Tabla 19 - Resultados del análisis financiero

COKacc	13.1%
VPN	S/. 2'404,990
TIR	75.1%
Periodo de recupero (Años)	1.43

Elaboración propia

Los resultados del análisis presentan un panorama positivo para el proyecto. El valor presente neto es de más de dos millones de soles, lo cual significa que teniendo un costo de oportunidad del 13.1%, el proyecto supera en más del doble de la inversión inicial, lo cual es un índice atractivo para la inversión.

Con respecto a la tasa interna de retorno, se genera un 75.1%, lo cual significa que generar el proyecto es más de cuatro veces más rentable que seguir operando en el

¹⁷Idemb

¹⁸Banco Central de Reserva – Spread Perú EMBIG (Diciembre 2012).

sector. Este es un dato muy atractivo, teniendo en cuenta que incluso el inversionista va a recibir mucho más de lo que inicialmente invirtió.

Con respecto al periodo de recupero, este es de un año y medio aproximadamente. Esto significa que ya para el segundo año se estaría generando utilidad propia del proyecto.

4.4 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad sirve para conocer cuáles son los cambios en las variables que podrían afectar la rentabilidad del proyecto. Las variables que impactan más en los resultados son conocidas como variables críticas. Se analizará las variables potencialmente críticas en tres escenarios: pesimista, moderado y optimista. Con esta información se definirán las variables más críticas para el proyecto.

Las variables que se consideran relevantes para el análisis son la penalización de la Municipalidad, el concepto por alquiler de vehículos y la reducción de las rutas optimizadas.

4.4.1 Penalización de la Municipalidad

- Escenario pesimista: La Municipalidad cobra el importe de 1'000,000 soles el primer año para efectuar los cambios: 600,000 soles debido a la multa y 400,000 para invertir en el distrito con obras complementarias a la optimización de rutas.
- Escenario moderado: La Municipalidad cobra el importe de 600,000 soles para efectuar los cambios.
- Escenario optimista: La Municipalidad decide no cobrar el importe de la multa, pero sí obliga a la empresa invertir 200,000 soles el año inicial como inversión

para la gestión de cambios en el proyecto y para obras complementarias a la optimización de rutas.

Se puede observar en la tabla 20 la sensibilidad para esta variable. La tasa interna de retorno aumenta a más del doble en un escenario optimista, y disminuye a casi la mitad en el escenario pesimista. En los tres escenarios, la figura es favorable para el inversionista, e incluso mantiene un periodo de recupero menor a 3 años.

Tabla 20 - Sensibilidad de variable penalización de la Municipalidad

	Pesimista	Moderado	Optimista
COKacc	13.1%	13.1%	13.1%
VPN (S/.)	2'056,277	2'404,990	2,747,298
TIR	49.4%	75.1%	159.9%
Periodo de recupero (años)	2.06	1.43	0.71

Elaboración propia

4.4.2 Concepto por alquiler de vehículos

- Escenario pesimista: La empresa logra alquilar los vehículos 4.8 horas diarias en promedio y cobra 50 soles por hora, el primer año.
- Escenario moderado: La empresa logra alquilar los vehículos 9.6 horas diarias en promedio y cobra 100 soles por hora, el primer año.
- Escenario optimista: La empresa logra alquilar los vehículos 12 horas diarias en promedio y cobra 150 soles por hora, el primer año.

Se puede observar en la tabla 21 la sensibilidad para esta variable. Se puede apreciar que el valor presente neto es el factor que varía más entre escenarios. El optimista incrementa el VPN en más del 15% que el escenario moderado, mientras que el pesimista reduce el beneficio en más del 33% respecto al moderado. En los tres escenarios la figura es favorable para el inversionista, e incluso mantiene un periodo de recupero es menor a 2 años.

Tabla 21 - Sensibilidad de variable concepto por alquiler de vehículos

	Pesimista	Moderado	Optimista
COKacc	13.1%	13.1%	13.1%
VPN (S/.)	1'599,018	2,404,990	2'806,265
TIR	56.2%	75.1%	84.1%
Periodo de recuero (años)	1.86	1.43	1.30

Elaboración propia

4.4.3 Reducción de las rutas optimizadas

- Escenario pesimista: La empresa logra reducir en 10% el tiempo inicial de recorrido.
- Escenario moderado: La empresa logra reducir en 20% el tiempo inicial de recorrido.
- Escenario optimista: La empresa logra reducir en 40% el tiempo inicial de recorrido.

Se puede observar en la tabla 22 la sensibilidad para esta variable. Se puede apreciar que los factores no varían en demasía con respecto al escenario moderado. Incluso en los tres escenarios la figura mantiene un periodo de recuero es menor a 2 años.

Tabla 22 - Sensibilidad de variable reducción de las rutas optimizadas

	Pesimista	Moderado	Optimista
COKacc	13.1%	13.1%	13.1%
VPN (S/.)	2'276,692	2'404,990	2'661,585
TIR	72.2%	75.1%	80.8%
Periodo de recuero (años)	1.48	1.43	1.34

Elaboración propia

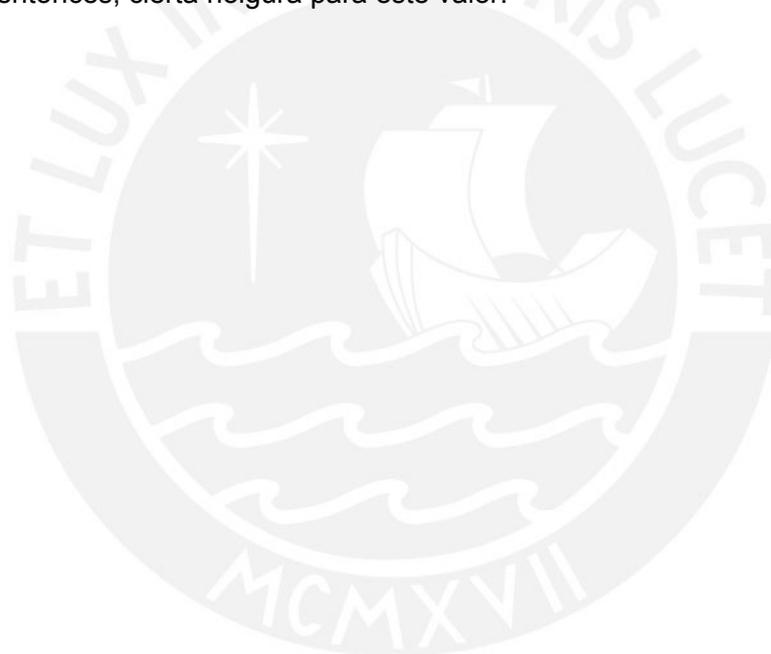
4.4.4 Análisis de variables críticas

Luego de revisar las variables, se observa que el costo crítico del proyecto es la penalización de la Municipalidad, y se debería tener en cuenta para poder realizar un

acuerdo que convenga en lo más posible a la empresa. Incluso, se podrían ofrecer alternativas de inversión que disminuyan el gasto de la multa, pero que sirvan para acordar un trato conveniente para ambas partes.

También se concluye que el beneficio de alquilar los vehículos es crítico, debido a las variaciones que genera en el flujo de caja, en cada uno de los escenarios. Para esto, se debería acordar darle importancia al alquiler de estos vehículos desocupados.

Como último punto, se encuentra que la reducción de los porcentajes de tiempo de recorrido no es crítico, pues las variables financieras no se ven tan afectadas. Puede tenerse entonces, cierta holgura para este valor.



CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- La optimización de rutas para una empresa de recolección de residuos sólidos se basa en gran parte en un modelo teórico, pero es fundamental tomar en cuenta el factor empírico para ajustar a la realidad el modelo con mayor exactitud.
- La sectorización de rutas brinda un ahorro para que las empresas puedan evitar alquiler de vehículos o utilizarlos para motivos adicional. En el caso de la empresa, este es el principal beneficio que obtiene, por no utilizar la capacidad máxima de sus vehículos. Brindan un beneficio como mínimo de S/. 200,000 al año.
- La implementación del modelo implica un valor presente neto de S/. 2'404,990 al año cero. Tomando en cuenta la inversión inicial de S/. 695,980, significa una ganancia de más del 145% respecto a la inversión inicial. Esto genera un atractivo grande para cualquier inversionista, y también se encuentra alineado a los resultados de las variables financieras halladas.
- El periodo de 1.43 años es un fuerte atractivo, pues significa que a partir del segundo año genera beneficios netos, que pueden servir para inversiones adicionales.
- Una de las razones externas a la optimización de rutas que explica las diferencias entre tiempo de recorrido de rutas entre el modelo propuesto y el tiempo real, es que el modelo propuesto se basa en supuestos, los cuales

generan una desviación respecto al tiempo real pues no se aplican como lo indica el modelo, sino que se ajusta y varía en el tiempo.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda a la empresa mantener un buen control de sus vehículos, rutas y costos de transporte, para poder mapear e implementar mejoras con mayor facilidad.
- Se recomienda a la empresa que utilice los modelos de programación como una base para adaptar un modelo final que conozca todas las características de la ruta a manejar.
- Se recomienda a la empresa que trabaje a la par con las áreas de soporte, para que pueda mejorar el rendimiento de su proceso principal.

6.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andina – BCR: Perú mantendrá perspectiva favorable de crecimiento en próximos años [en línea]. [Fecha de consulta: 10 de Febrero de 2012]. Disponible en:<<http://www.andina.com.pe/Espanol/noticia-bcr-peru-mantendra-perspectiva-favorable-crecimiento-proximos-anos-446812.aspx>>
- AFP Integra - Sistema Privado de Pensiones [en línea]. [Fecha de consulta: 09 de Febrero de 2012]. Disponible en:<<http://www.integra.com.pe/wps/wcm/connect/websiteintegra/es/sispriv/>>
- BANCO CENTRAL DE RESERVA
2013 REPORTE DE INFLACIÓN: Panorama actual y proyecciones macroeconómicas 2013-2014.
- BANCO CENTRAL DE RESERVA
2012 Spread Perú EMBIG.
- BRAVO ORELLANA, Sergio
2004 El Capital Asset Pricing Model – CAPM.
- CERRÓN, Marco A.
2000 Diseño de Rutas Óptimas de Recolección de Residuos sólidos domésticos mediante el Software Mars. XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
- CONCEJO MUNICIPAL DISTRITAL DE LOS OLIVOS
2011 Plan Distrital de Manejo y Gestión de Residuos Sólidos 2011 - 2013.
- CORDOVA, Manuel

- 2009 Estadística Descriptiva e Inferencial. *Quinta Edición*. Lima: MOSHERA S.R.L.
- DANTZIG, G., RAMZER, J.
1959 The truck dispatching problem. *Management Science* 6.
 - DAMODARÁN, Esperanza
2013 Betas por sector para cálculo de WACC [en línea]. [Fecha de consulta: 15 de Enero de 2013]. Disponible en: <<http://www.epiredperu.net/EstadisticaSanfer/docs/0604-analisisdescriptivovarcuantit.pdf>>
 - KAFKA, Folke
2004 Evaluación estratégica de proyectos de inversión. Lima: Universidad del Pacífico, Biblioteca Universitaria.
 - FUERZA SOCIAL - Plan de Gobierno 2010 [en línea]. [Fecha de consulta: 14 de Junio de 2012]. Disponible en: < <http://www.susanavillaran.pe/pgsv.pdf>>
 - GARCÍA CRIBILLEROS, Esperanza
Análisis Descriptivo de Variables Cuantitativas [en línea]. [Fecha de consulta: 10 de Octubre de 2012]. Disponible en: <<http://www.epiredperu.net/EstadisticaSanfer/docs/0604-analisisdescriptivovarcuantit.pdf>>
 - GAREY, M., JOHNSON, D
1979 Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness. W. H. Freeman and Company.
 - KONG, Maynard
2010 Investigación de Operaciones. Lima: PUCP, Fondo Editorial.
 - LOUGEE, Mary

Cómo calcular el precio de la gasolina en bote [en línea]. [Fecha de consulta: 25 de Noviembre de 2012]. Disponible en: <http://www.ehowenespanol.com/calcular-consumo-gasolina-bote-como_3283/>

- MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - Anuario Estadístico 2010 [en línea]. [Fecha de consulta: 14 de Junio de 2012]. Disponible en: <http://www.mtc.gob.pe/portal/AE2010_REVISION_14_06_2011_V2-Rev.pdf>
- OLIVERA, Alfredo
2004 Heurística para Problemas de Ruteo de Vehículos. Montevideo: Universidad de la República.
- RACERO, Jesús
2006 Optimización del sistema de rutas de recolección de residuos sólidos domiciliarios (Ecoeficiencia)
- REYES, Jefferson, SANDOYA, Fernando
2009 Uso e Implementación de métodos meta heurísticos de tipo tabú para resolución de problemas de optimización duros
- SEDESÓL
1999 Manual de Técnicas Administrativas para el Servicio de Limpia Municipal.
- TOTH, P., VIGO, D.
2000 An Overview of Vehicle Routing Problems. SIAM.