



Universidad de Jaén

Facultad de Ciencias Sociales
y Jurídicas

Trabajo Fin de Grado

PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS EN LA ZONA ESTE DE ANDALUCÍA PARA LA EMPRESA DE RECICLAJE “SOLACEITE”

Alumno: Carlos Luis Rodríguez Rodríguez

Mayo, 2020

INDICE:

1. RESUMEN.

2. PALABRAS CLAVE.

3. INTRODUCCIÓN.

4. OBJETIVOS y METODOLOGÍA.

4.1. El Problema del Comerciante Viajero.

4.2. El Problema de Enrutamiento de Vehículos (VRP).

4.3. Variantes del VRP.

4.4. Métodos para resolver el VRP.

4.4.1. Exactos.

4.4.2. Heurísticos.

4.4.3. Metaheurísticos.

4.5. Introducción a Métodos para nuestro problema.

4.5.1. Búsqueda Local.

4.5.2. Vecino más Cercano.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.1. VRP de Córdoba.

5.2. VRP de Granada.

5.3. VRP de Almería.

5.4. VRP de Jaén.

6. CONCLUSIONES.

7. BIBLIOGRAFÍA.

8. ANEXOS.

I. Algoritmo Propio.

1. RESUMEN.

“Solceite” es una empresa, cuya actividad se basa en el reciclado de aceite usado, que nos plantea un problema de enrutamiento para la zona Este de Andalucía.

Para ello se realiza un análisis de la zona y se da solución al problema VRP (Vehicle Routing Problem) utilizando los métodos de “Búsqueda Local” y de “Vecino más Cercano”. Con lo que se consigue encontrar las rutas óptimas y necesarias para transportar el aceite usado de los puntos limpios de la comarca hasta los almacenes de cada provincia, mediante la mejora de rutas que han sido creadas de forma automática por un algoritmo propio desarrollado para este proyecto.

2. PALABRAS CLAVE.

VRP (problema de enrutamiento de vehículos); problema del agente viajero; metaheurísticas; Andalucía.

3. INTRODUCCIÓN.

El cambio socio-cultural que estamos experimentando respecto al medio ambiente y a la sostenibilidad hacen de manifiesto la necesidad del reciclado. En este contexto, el aceite usado forma parte de los bienes desechados más importantes.

Nuestra empresa ha realizado un estudio para la recogida de este en los distintos puntos limpios de toda la zona Este de Andalucía, con el objetivo de dar solución al problema de enrutamiento en las diferentes provincias que la componen y del traslado del producto a la sede central Andaluza, situada en Jaén.

Para ello hemos utilizado primeramente un algoritmo creado para diseñar rutas aleatorias que visitan puntos limpios colindantes, seguidamente se han mejorado partiendo de las teorías ya existentes sobre el tema y finalmente se han encontrado los caminos cercanos a los óptimos por los que se va a transportar el aceite usado para su posterior procesamiento.

Se introducen las teorías utilizadas en el proyecto tales como: la metodología de VRP (problema de enrutamiento de vehículos) y sus distintas variantes; los distintos métodos existentes para la resolución de este tipo de problemas; y más detalladamente, los métodos utilizados de “Búsqueda Local” y “Vecino más Cercano” con los que se va a dar solución al problema.

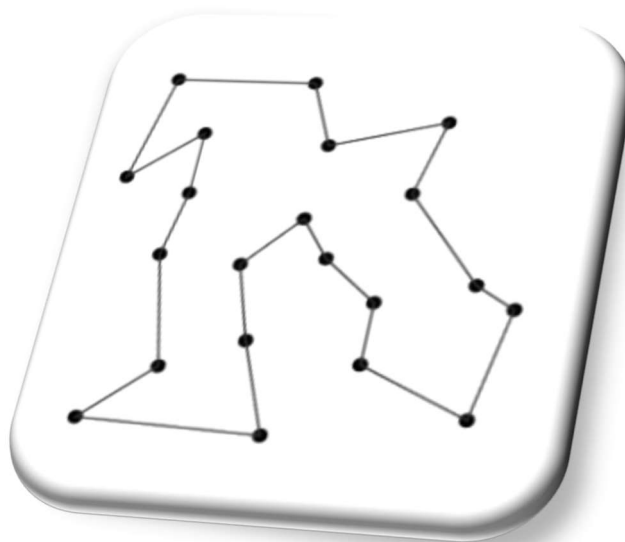
4. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.

4.1. EL PROBLEMA DEL COMERCIANTE VIAJERO O VIAJANTE.

En el contexto de problemas de rutas y de problemas de logística, nos encontramos con el ejemplo del problema del viajante, que es la situación más sencilla en la que nos podemos encontrar ante este tipo de problemas. También conocido como TSP (Travelling Salesman Problem) es uno de los más famosos: un viajante necesita visitar “n” puntos o ciudades, pasando por cada una de ellas una sola vez, empezando por una de las ciudades y acabando en la misma. El problema de este, es encontrar la distancia mínima total.

Para explicar este problema, se introduce el concepto de grafo y de grafo hamiltoniano, un grafo en el que se pueden visitar todos los puntos o nodos de uno en uno sin posibilidad de volver a pasar por los mismos más de una vez, y con la condición de acabar en un nodo adyacente al de partida. El primero en introducir este problema fue el matemático W.R. Hamilton. (Maryam Mirzajani, 2018).

Ilustración 1. Problema del agente viajero



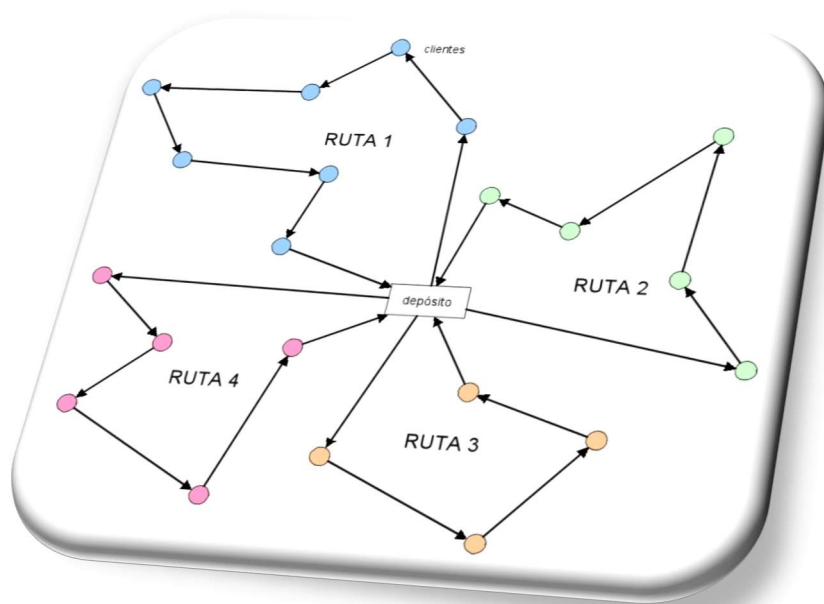
(Fuente: M. Ripoll M. L. (2018) "El problema del Vendedor Viajero...")

4.2. PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS (VRP).

Nuestro trabajo se enmarca dentro de los problemas de enrutamiento con vehículos o (VRP) que desde su aparición en 1959 por Dantzig y Ramser se han generado multitud de estudios sobre el mismo.

“El objetivo es el de minimizar la distancia total recorrida por un conjunto de vehículos ubicados en un almacén central, para satisfacer la demanda de un determinado conjunto de clientes. Cada cliente tiene una demanda conocida y cada vehículo sirve de única ruta durante el periodo de planificación, teniendo ésta que comenzar y finalizar en el almacén central. Este problema es una generalización del Problema del Agente Viajero muy conocido y ampliamente estudiado.” (Molina J.C. “Problema de optimización de rutas...”, 18).

Ilustración 2. Problema VRP



(Fuente: Rodríguez Villalobos, A. (2007). "Esquema básico de un problema VRP")

4.3. VARIANTES DEL PROBLEMA VRP.

Existen multitud de variantes del problema VRP clásico en la literatura, adaptándose a la diversidad de casos que podemos encontrarnos en los contextos reales. Esta diversidad se consigue mediante la agregación, al problema inicial VRP, de nuevas variables y restricciones que se exigen en cada caso particular.

Se dan las siguientes variantes al VRP (Autor: -. “Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications”, 2nd ed. Editorial: Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics; Mathematical Optimization Society, 2014)

Tabla 1. Distintos problemas de VRP

Distintos problemas VRP	Características principales
VRP	El objetivo es encontrar un conjunto de rutas de mínimo coste, que salen del depósito, entregan un subconjunto de clientes y regresan al depósito.
OVRP	Al finalizar la entrega, los vehículos no están obligados a volver al depósito.
COVRP	Es una variante del OVRP, donde además de no estar obligado a volver al depósito, tiene como restricción la capacidad del vehículo.
CVRP	Los vehículos tienen una capacidad ilimitada.
VRPTW	Con ventanas de tiempo, los clientes tienen asignado un intervalo de tiempo para ser atendidos.
VRPPD	Con entrega y recogida, los clientes tienen la posibilidad de recibir y/o devolver bienes.
SDVRP	Con entrega dividida, donde se permite que un cliente pueda ser atendido por varios vehículos, su demanda excede la capacidad de un vehículo, y se necesita que el vehículo pase por el mismo punto varias veces.
MDVRP	Con múltiples depósitos. Existen varios depósitos con una flota de vehículos independiente.

(Fuente: Elaboración propia)

4.4. DIFERENTES MÉTODOS PARA RESOLVER EL VRP.

Se pueden agrupar en tres métodos diferentes, según (Toth y Vigo, 2002):

4.4.1. Métodos Exactos.

La búsqueda, en este tipo de métodos, de la solución óptima no resulta fácil, pues computacionalmente exige demasiados recursos, por lo que se hace poco factible si nos encontramos con un problema con demasiados nodos o puntos a los que visitar. Sin embargo, si hablamos de un caso con pocos nodos, el problema puede ser resuelto de forma asequible.

Se trata entonces de métodos cuyo objetivo es encontrar el resultado óptimo al problema, es decir, exactamente el mejor. (Baldacci R., Toth P. and Vigo D. (2007). “Recent advances in vehicle routing exact algorithms”, 4OR A Quarterly Journal of Operations Research, 5(4), pp.269-298).

Dos ejemplos de métodos exactos:

- **Método de Branch and Bound:** Consiste en dividir el problema en problemas más pequeños, resolverlos de forma individual y finalmente consolidar las soluciones generando una solución al problema original. (Bakarcic & Di Piazza, 2012).
- **Método de Branch and Cut:** Este algoritmo desciende del método anterior, Branch and Bound. El algoritmo de Branch and Cut detecta las ramificaciones que proporcionan soluciones distantes de la óptima para podarlas, de esta manera aprovecha sus recursos para encontrar la solución óptima. (Bakarcic & Di Piazza, 2012).

4.4.2. Heurísticas.

- Son los algoritmos mediante los cuales se dan soluciones aproximadas, muy cerca de la solución óptima. Implican un tiempo computacional razonable. Debido a la complejidad del problema, se haya una solución buena sin llegar a ser la óptima, debido principalmente al número de nodos o puntos a los que visitar y a la dificultad, computacional, que ello conlleva. (Golden, B. (2008): “The Vehicle Routing Problem: Lastest Advances and a New Chanllenges”. Edición: -. Editorial: Boston, MA. pp.13-19.)

Algunos ejemplos de estos métodos:

- **La heurística de Clark & Wright:** El algoritmo parte de dos rutas originales, las cuales al combinarlas forman una nueva ruta dando como resultado un ahorro en el coste dejando una sola ruta (Lysgaard & Sorensen, 1997).

- **Heurística de Búsqueda Local:** Es un proceso por el cual, dada una posible solución inicial, se selecciona iterativamente otra solución del entorno para continuar la búsqueda de la solución cercana a la óptima.
- **La heurística del Vecino más Cercano:** Este algoritmo construye las rutas secuencialmente, seleccionando de manera iterativa los puntos con menos distancia para insertarlos a la ruta (Contreras P. & Díaz D., 2010).
- **Cluster First, Route Second:** Este trabaja en dos fases, en la primera fase agrupa los puntos teniendo en cuenta las restricciones de capacidad del vehículo y en la segunda fase se crean las rutas. (Prins, Lacomme, & Prodhon, 2014).
- **Route First, Cluster Second:** En este caso el algoritmo se desarrolla también en dos fases, en la primera se hace un ruteo donde se visitan los clientes y en la segunda se crean los cluster basados en las restricciones de capacidad. (Beasley, 1983) (Lüer, Benavente, Bustos, & Venegas, 2009).

4.4.3. Metaheurísticas:

Las metaheurísticas tienen como objetivo explorar eficientemente espacios de búsqueda de soluciones más cercanas a las soluciones óptimas, mejorando procedimientos heurísticos generales. El término metaheurística se obtiene de anteponer a heurística el sufijo “meta” que significa “más allá” (Blum & Roli, 2001). Los algoritmos metaheurísticos no visitan de manera iterativa cada elemento en el espacio de búsqueda, en realidad guían su proceso de búsqueda hacia las regiones que pueden contener soluciones de alta calidad (Dib, Manier, Moalic & Caminada, 2015), (Olafsson, S., (2006), “Metaheuristics”, Chapter 21 in Handbooks in Operations Research and Management Science: Simulation. North-Holland).

Algunos ejemplos:

- **Algoritmo de Colonia de Hormigas:** Se basa en el comportamiento real de una colonia de hormigas que busca alimento fuera del hormiguero. Las hormigas tienen en cuenta el camino de salida de la colonia, inicialmente salen de manera aleatoria y una vez encuentran su alimento, regresan dejando un rastro de feromonas que le permite a otras hormigas seguir este mismo camino, reforzando así las mejores soluciones.

Para el caso del algoritmo artificial basado en este comportamiento, las hormigas artificiales crean sus soluciones secuencialmente moviéndose de un punto a otro. Las hormigas artificiales utilizan una feromona artificial que es la modificación de unos valores numéricos, de tal modo que el mecanismo permite a las hormigas olvidar caminos anteriores, poco atractivos, para enfocarse en nuevas direcciones, más prometedoras. (Franco, 2010), (Bell J.E., McMullen P.R.: (2004) “Ant colony optimization... pp.41-48)

- **Algoritmo Genético:** Se fundamenta en la teoría de selección natural. Dirige su búsqueda en la información que dio mejores resultados para buscar una mejor solución, eliminando la información que no proporcione mejoría. (Franco, 2010), (Dib, Manier, Moalic y Caminada, 2015), (Holland J.H. (1975), “Adaptation in Natural and Artificial Systems”)
- **Algoritmo de Búsqueda Tabú:** La resolución mediante este método se basa en el uso de una memoria adaptativa, siendo este su carácter distintivo. Esta es de corto plazo para no dar pie a ciclos de búsqueda y es implementada mediante una lista (lista tabú) que recoge los puntos soluciones ya visitadas recientemente. Pueden ser caminos o diferencias entre dos soluciones. (Franco, 2010), (Dib, Manier, Moalic y Caminada, 2015), (Willard, 1989, Pureza y França, 1991).

4.5. INTRODUCCIÓN DE MÉTODOS PARA EL VRP DE “SOLACEITE”

Una vez vistas las variantes del problema VRP así como de los diferentes métodos existentes para su resolución, nos enmarcamos en la decisión de ver ante qué problema nos enfrentamos y cuáles van a ser los métodos más adecuados para resolverlo.

Nos encontramos entonces ante un problema clásico de VRP, los vehículos deben volver al depósito y además tienen capacidad limitada, aunque esto último no es demasiado importante ya que existen multitud de vehículos cisterna en el mercado con distintas capacidades y como veremos más adelante, esto no será un problema.

Por tanto, la elección del método elegido es una combinación de dos fases. Primeramente, se hallan los mejores caminos posibles mediante la creación de rutas aleatorias. Seguidamente, en la segunda fase, se realiza una mejora de estas con el método de “Búsqueda Local” y “Vecino más Cercano”. Y finalmente, se eligen las rutas que mejor que adapten a nuestro problema y den los mejores resultados.

4.5.1. Heurística de Búsqueda Local:

Anteriormente ya introducimos este método brevemente, ahora veremos más detalladamente en que consiste esta heurística para introducirla en nuestro problema de enrutamiento.

Las heurísticas de búsqueda local, son algoritmos iterativos, que siguen un esquema de pasos a seguir:

Primeramente, partimos de una solución inicial x_0 , que no es más que un vector con n coordenadas, siendo “ n ” la cantidad de puntos o nodos del problema, y siendo cada nodo una coordenada determinada. Este vector nos informa de los puntos por los cuales se desarrolla la ruta. Si por ejemplo el vector contiene 4 coordenadas, nos indica que son cuatro los nodos o ciudades de nuestro problema. Además, nos dice con las cifras 0 y 1, por donde pasa el vehículo, siendo 0 que no visita la ciudad y 1 que sí. Es importante

aclarar que la posición que ocupan las diferentes coordenadas es importante ya que se refiere a cada una de las ciudades.

Por tanto, como hemos dicho, tenemos una solución inicial, vector inicial, que llamaremos x_0 , del cual iremos obteniendo en la primera iteración, todas las posibles soluciones o vectores vecinos (es decir, vectores diferentes, ya que al tratarse de una codificación binaria, el vecino siempre será cualquier otro vector diferente al inicial, en este caso, en al menos alguna coordenada) dentro del espacio vectorial de todas las posibles soluciones, de esta forma obtendremos para esta primera iteración una lista con todas las posibles soluciones.

Ahora se trata de calcular los costes o funciones objetivo de esas soluciones para que finalmente, encontremos el mejor vector, mejor coste tenga (dependiendo de si nuestro problema es de minimizar o de maximizar) y lo añadiremos a una lista de soluciones destacadas, $N(x)$.

El proceso se repite para las siguientes “i” iteraciones, obteniendo los vectores vecinos del mejor vector solución de la lista $N(x_{i-1})$, es decir, el mejor vector hallado en la iteración anterior. De esta forma, con i iteraciones obtenemos i listas de vectores solución $N(x_i)$, y de cada una de ellas destacamos la mejor. Con todas estas creamos la lista final de soluciones óptimas locales $N(x)$. El algoritmo se detiene cuando no se puede encontrar una solución mejor, dentro de la $N(x_i)$, que el vector ganador de la iteración anterior. Quedando cerrada y acabada la lista $N(x)$.

El término “local” se utiliza frecuentemente en los estudios teóricos y prácticos de las metaheurísticas de búsqueda. Se asocia al uso de estructuras de entorno, reflejando el concepto de proximidad o vecindad entre las soluciones alternativas del problema.

4.5.2. Heurística de vecino más cercano:

Este método se basa en la búsqueda de una ruta óptima, al igual que todos los métodos, pero en este caso se trata de ir agregando a esta, de forma secuencial, los nodos vecinos, es decir, eligiendo nodos en los que la distancia entre ellos sea mínima y así formar la ruta más corta.

Para nuestro problema de enrutamiento, este método lo utilizamos, primeramente, en la fase uno, para diseñar rutas aleatorias con nuestro algoritmo propio (detallado en el anexo I) eligiendo nodos colindantes, pero no solo con distancia mínima, ya que esto no daría buenos resultados. De esta forma se crean rutas con nodos no elegidos arbitrariamente, sino que, secuencialmente se incorporan nuevos nodos colindantes al anterior.

En la segunda fase, en el proceso de mejora por Búsqueda Local, también se utilizará esta heurística para encontrar las rutas alternativas a las iniciales y llegar hasta la óptima.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

La solución al problema de enrutamiento se ha llevado a cabo mediante la separación, de la zona Este de Andalucía en 4 partes, que corresponden a las provincias de Córdoba, Granada, Almería y Jaén, siendo esta última la sede central donde se encuentra el almacén principal donde se almacena y prepara el aceite para su posterior transporte hasta la fábrica de procesamiento, situada en la capital española.

Este trabajo se compone, por tanto, de 4 problemas de VRP al que se les da solución de forma separada para, finalmente, unificarlos en uno solo y dar solución al territorio Andaluz.

A continuación, se van a ir presentando cada una de las provincias, sus características más relevantes para este trabajo, su problemática y finalmente su resolución.

Hay que destacar que este proceso de resolución conlleva una serie de pasos, secuenciales, que pueden llegar a ser algo tediosos para el lector. No obstante, para apaciguar esto, se ha presentado de forma completa y clara la primera provincia, Córdoba. Y el resto, de una forma algo más resumida, dando más importancia a los resultados que se han ido obteniendo sistemáticamente que al desarrollo de las técnicas con las que se resuelve el problema. Ya que la mecánica de resolución de cada provincia se realiza de forma idéntica, se vuelve repetitiva y se ha optado por esta decisión.

Primeramente se expone la información necesaria: las distancias entre los puntos limpios, el aceite almacenado en estos y la matriz de vecindad, que nos informa de los puntos que son colindantes; a continuación se obtienen las rutas aleatorias mediante el algoritmo creado para este proyecto; se seleccionan y se utilizan como rutas iniciales en el proceso de “búsqueda local”, por el cual se mejoran estas rutas; y finalmente se obtienen las rutas finales, que son solución al VRP de la provincia.

5.1. El VRP PARA CÓRDOBA:

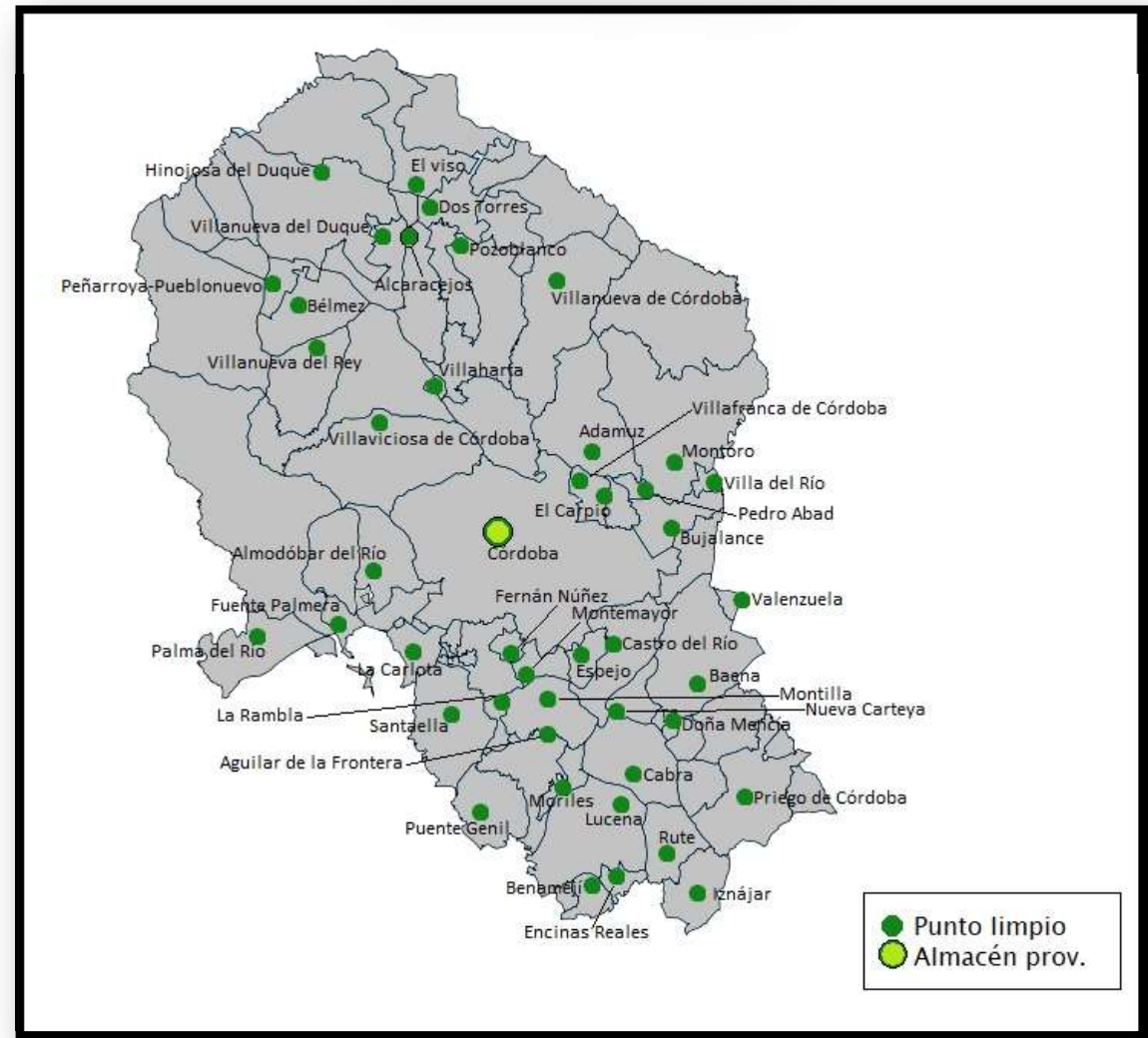
La provincia de Córdoba se compone de 77 municipios en total, de los cuales, 45 cuentan con punto limpio. Por tanto, se dispone de 45 nodos para el problema de enrutamiento, lo que supone un reto para encontrar las rutas óptimas o cercanas.

Al igual que con las demás provincias, se han estimado las cantidades de aceite de las que se dispone en cada uno de los puntos limpios de forma mensual. Para lo cual, se han agrupado las estimaciones de cada localidad en los diferentes puntos limpios, según la distancia geográfica que hay entre estos y los municipios. Por tanto, los puntos limpios contienen el aceite de los municipios más cercanos.

Las cifras de aceite, en litros mensuales, se muestran más abajo en la tabla correspondiente.

En el mapa siguiente, podemos visualizar estos puntos limpios y como se distribuyen ampliamente por la comarca cordobesa.

(MAPA PUNTOS LIMPIOS CÓRDOBA)



(Fuente: Elaboración propia)

A continuación, se presentan las diferentes matrices y tablas que contienen la información referente y necesaria para la resolución del problema. La primera matriz contiene las distancias en horas entre los diferentes puntos limpios, seguidamente se muestra la tabla con los puntos limpios, los municipios agrupados por su punto limpio más cercano y por tanto, al que se lleva el aceite usado y las cantidades totales de aceite que contienen estos mensualmente y por último se presenta una matriz, necesaria para el desarrollo de nuestro algoritmo propio, creado para realizar las rutas aleatorias, que contiene los diferentes puntos limpios y cuáles son sus puntos colindantes.

- Tabla de aceite usado correspondiente a cada punto limpio y a cada municipio, realizado por estimación en litros mensuales:

(HOJA CON LITROS DE ACEITE POR MUNICIPIOS Y PUNTOS LIMPIOS, CÓRDOBA)

PUNTOS LIMPIOS CÓRDOBA		MUNICIPIOS	HABITANTES	RECICLAJE / MUNICIPIO	TOTAL LITROS / MES
1	Adamuz	Adamuz	4.185	447,9	447,9
2	Aguilar de la Frontera	Aguilar de la Frontera	13.435	1.437,8	1.437,8
3	Alcaracejos	Alcaracejos	1.473	157,6	281,1
		Villaralto	1.154	123,5	
4	Almodobar del Río	Almodóvar del Río	7.964	852,3	2.293,0
		Guadalcázar	1.578	168,9	
		Hornachuelos	4.541	486,0	
		Posadas	7.343	785,9	
5	Baena	Baena	19.338	2.069,6	2.069,6
6	Bélmez	Belmez	2.964	317,2	317,2
7	Benamejí	Benamejí	4.975	532,4	690,9
		Palenciana	1.481	158,5	
8	Bujalance	Bujalance	7.537	806,6	1.124,4
		Cañete de las Torres	2.969	317,7	
9	Cabra	Cabra	20.417	2.185,0	2.185,0
10	Castro del Río	Castro del Río	7.834	838,4	838,4
11	Córdoba	Córdoba	325.708	34.857,4	34.857,4
12	Doña Mencía	Doña Mencía	4.684	501,3	894,9
		Luque	3.037	325,0	
		Zuheros	641	68,6	
13	Dos Torres	Añora	1.524	163,1	459,4
		Dos Torres	2.416	258,6	
		El Guijo	353	37,8	
14	El Carpio	El Carpio	4.457	477,0	477,0
15	El Viso	Santa Eufemia	768	82,2	357,0
		El Viso	2.568	274,8	
16	Encinas Reales	Encinas Reales	2.285	244,5	244,5
17	Espejo	Espejo	3.333	356,7	356,7
18	Fernan Nuñez	Fernan Nuñez	9.668	1.034,7	1.121,8
		San Sebastián de los B.	814	87,1	
19	Fuente Palmera	Fuente Carreteros	1.081	115,7	1.273,3
		Fuente Palmera	10.817	1.157,6	
20	Hinojosa del Duque	Belalcázar	3.273	350,3	1.085,3
		Hinojosa del Duque	6.868	735,0	
21	Iznájar	Iznájar	4.343	464,8	464,8
22	La Carlota	La Carlota	14.067	1.505,5	1.898,9
		La Guijarrosa	1.392	149,0	
		La Victoria	2.284	244,4	
23	La Rambla	Montalbán de Córdoba	4.429	474,0	1.277,5
		La Rambla	7.508	803,5	

PUNTOS LIMPIOS CÓRDOBA		MUNICIPIOS	HABITANTES	RECICLAJE / MUNICIPIO	TOTAL LITROS / MES
24	Lucena	Lucena	42.530	4.551,6	4.551,6
25	Montemayor	Montemayor	3.874	414,6	414,6
26	Montilla	Montilla	23.031	2.464,8	2.464,8
27	Montoro	Montoro	9.436	1.009,8	1.009,8
28	Moriles	Monturque	1.964	210,2	608,9
29		Moriles	3.726	398,8	
30	Nueva Carteya	Nueva Carteya	5.393	577,2	577,2
31	Palma del Río	Palma del Río	21.159	2.264,4	2.264,4
32	Pedro Abad	Pedro Abad	2.834	303,3	303,3
33	Peñarroya-Pueblonuevo	Los Blázquez	681	72,9	1.859,6
34		Fuente la Lancha	350	37,5	
35		Fuente Obejuna	4.651	497,8	
36		La Granjuela	456	48,8	
37	Pozoblanco	Peñarroya-Pueblonuevo	10.870	1.163,3	2.120,5
38		Valsequillo	368	39,4	
39	Priego de Córdoba	Pedroche	1.529	163,6	3.010,3
40		Pozoblanco	17.222	1.843,1	
41		Torrecampo	1.063	113,8	
42	Pueblo de Córdoba	Almedinilla	2.409	257,8	3.010,3
43		Carcabuey	2.454	262,6	
44		Fuente-Tójar	680	72,8	
45	Puente Genil	Priego de Córdoba	22.585	2.417,1	3.236,4
46		Puente Genil	30.241	3.236,4	
47	Rute	Rute	9.857	1.054,9	1.054,9
48	Santaella	Santaella	6.014	643,6	643,6
49	Valenzuela	Valenzuela	1.157	123,8	123,8
50	Villa del Río	Villa del Río	7.200	770,5	770,5
51	Villafranca de Córdoba	Villafranca de Córdoba	4.861	520,2	520,2
52	Villaharta	Espiel	2.438	260,9	542,7
53		Obejo	1.990	213,0	
54		Villaharta	643	68,8	
55	Villanueva de Córdoba	Cardeña	1.503	160,9	724,0
56		Conquista	401	42,9	
57		Villanueva de Córdoba	4.861	520,2	
58	Villanueva del Duque	Villanueva del Duque	1.494	159,9	159,9
59	Villanueva del Rey	Villanueva del Rey	1.068	114,3	114,3
60	Villaviciosa de Córdoba	Villaviciosa de Córdoba	3.298	353,0	353,0

(Fuente: Elaboración propia)

- Matriz de puntos limpios vecinos o colindantes:

(HOJA DE PUNTOS LIMPIOS VECINOS, CÓRDOBA)

PUNTO LIMPIO	Adamuz	Aguilar de la Frontera	Alcaracejos	Almodobar del Río	Baena	Bélmex	Benamejí	Bujalance	Cabra	Castro del Río	Córdoba	Doña Mencía	Dos Torres	El Carpio	El Viso	
VECINOS	Villafranca de Córdoba Pedro Abad Montoro Villanueva de Córdoba Villaharta Villaviciosa de Córdoba	Montilla Nueva Carteya Cabra Moriles Puente Genil La Rambla	Pozoblanco Dos Torres Villanueva del Duque Villaviciosa de Córdoba Villanueva del Rey Villaharta	Villaviciosa de Córdoba Córdoba Fernan Nuñez La Carlota Fuente Palmera	Priego de Córdoba Doña Mencía Nueva Carteya Castro del Río Bujalance Valenzuela	Peñarroya-Pueblonuevo Hinojosa del Duque Villanueva del Duque Villanueva de Córdoba Villaharta Villanueva del Rey	Encinas Reales Moriles Puente Genil	Villa del Río Montoro Moriles Pedro Abad Córdoba Fernan Nuñez Castro del Río Baena Valenzuela	Lucena Moriles Aguilar de la Frontera Montilla Nueva Carteya Doña Mencía Priego de Córdoba Rute	Espejo Córdoba El Carpio Bujalance Castro del Río Valenzuela Baena Doña Mencía Nueva Carteya	Villafranca de Córdoba El Carpio Bujalance Castro del Río Espejo Fernan Nuñez Santaella La Carlota Almodobar del Río Villaviciosa de Córdoba Villaharta	Baena Priego de Córdoba Cabra Nueva Carteya Castro del Río	El Viso Pozoblanco Alcaracejos	Villafranca de Córdoba Córdoba Castro del Río Bujalance Pedro Abad	Hinojosa del Duque Dos Torres Villanueva del Duque	

	Encinas Reales	Espejo	Fernan Nuñez	Fuente Palmera	Hinojosa del Duque	Iznájar	La Carlota	La Rambla	Lucena	Montemayor	Montilla	Montoro	Moriles	Nueva Carteya	
	Benamejí Iznájar Rute Lucena	Castro del Río Nueva Carteya Montilla Montemayor Fernan Nuñez Córdoba	Córdoba Espejo Montemayor La Rambla La Carlota Almodobar del Río	Palma del Río Almodobar del Río La Carlota	El Viso Villanueva del Duque Peñarroya-Pueblonuevo	Encinas Reales Rute Priego de Córdoba	Santaella La Rambla Fernan Nuñez Córdoba Almodobar del Río Fuente Palmera	Santaella La Carlota Montemayor Montilla Aguilar de la Frontera Puente Genil	Encinas Reales Rute Priego de Córdoba Cabra Moriles	Fernan Nuñez Espejo Montilla La Rambla	Montemayor Espejo Nueva Carteya Aguilar de la Frontera La Rambla	Adamuz Pedro Abad Bujalance Villa del Río Villanueva de Córdoba	Aguilar de la Frontera Nueva Carteya Cabra Lucena Benamejí Puente Genil Santaella	Doña Mencía Baena Castro del Río Espejo Montilla Aguilar de la Frontera Moriles Cabra	

	Palma del Río	Pedro Abad	Peñarroya-Pueblonuevo	Pozoblanco	Priego de Córdoba	Puente Genil	Rute	Santaella	Valenzuela	Villa del Río	Villafranca de Córdoba	Villaharta	Villanueva de Córdoba	Villanueva del Duque	Villanueva del Rey	Villaviciosa de Córdoba
	Fuente Palmera Santaella	Montoro Villa del Río Bujalance El Carpio Adamuz	Bélmex Hinojosa del Duque Villanueva del Duque	Villanueva de Córdoba Villaharta Alcaracejos Dos Torres	Iznájar Rute Lucena Cabra Doña Mencía Baena	Benamejí Moriles Aguilar de la Frontera La Rambla Santaella	Iznájar Priego de Córdoba Lucena Encinas Reales	Moriles Palma del Río Puente Genil La Rambla La Carlota	Villa del Río Bujalance Castro del Río Baena Valenzuela	Montoro Pedro Abad Bujalance Valenzuela	Adamuz El Carpio Córdoba Villanueva de Córdoba Villaharta	Villafranca de Córdoba Adamuz Villanueva de Córdoba Pozoblanco Alcaracejos Villanueva del Rey Villaviciosa de Córdoba Córdoba	Pozoblanco Villaharta Adamuz Montoro	Alcaracejos El Viso Hinojosa del Duque Peñarroya-Pueblonuevo Bélmex Villaviciosa de Córdoba	Villaharta Villanueva de Córdoba Alcaracejos Villanueva del Duque Bélmex	Villaviciosa de Córdoba Villaharta Córdoba Almodobar del Río Villanueva del Rey

(Fuente: Elaboración propia)

➤ Resolución del VRP en Córdoba:

- Rutas con algoritmo propio:

(La funcionalidad de nuestro algoritmo se puede ver de forma detallada en el anexo I.)

Se han obtenido rutas aleatorias mediante el algoritmo creado para el caso. Al contar con 45 nodos en esta provincia, hemos realizado más repeticiones para obtener mejores rutas e intentar encontrar una mayor diversidad de puntos limpios por ruta.

Este proceso inicial por el cual se obtienen de forma aleatoria, pero teniendo en cuenta los nodos vecinos, es solo la primera parte de la resolución al problema que planteamos.

Seguidamente se muestra una lista con las 20 mejores rutas que se han generado.

(TABLA MEJORES RUTAS DE PRIMER PASO: OBTENCIÓN DE RUTAS POR ALGORITMO PROPIO; CÓRDOBA)

OBTENCIÓN DE MEJORES RUTAS EN LA 1ª REPETICIÓN POR ALGORITMO PROPIO										TOTAL TIEMPO HORAS	TOTAL CARGA LITROS
1	CÓRDOBA	FERNAN NUÑEZ	ESPEJO	MONTEMAYOR	MONTILLA	LA RAMBLA	SANTAELLA	LA CARLOTA	CÓRDOBA	6,97	8.177,9
2	CÓRDOBA	CASTRO DEL RÍO	BAENA	PRIEGO DE CÓRDOBA	DOÑA MENCIA	NUEVA CARTEYA	ESPEJO	CÓRDOBA		7,02	7.747,0
3	CÓRDOBA	LA CARLOTA	FUENTE PALMERA	ALMODOBAR DEL RÍO	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	CÓRDOBA				5,52	5.818,2
4	CÓRDOBA	ESPEJO	NUEVA CARTEYA	MONTILLA	MONTEMAYOR	FERNAN NUÑEZ	CÓRDOBA			5,30	4.935,0
5	CÓRDOBA	SANTAELLA	PUENTE GENIL	LA RAMBLA	LA CARLOTA	CÓRDOBA				5,28	7.056,4
6	CÓRDOBA	BUJALANCE	MONTORO	ADAMUZ	VILLAHARTA	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	CÓRDOBA			6,32	3.645,0
7	CÓRDOBA	VILLAHARTA	VILLANUEVA DEL REY	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	ALMODOBAR DEL RÍO	CÓRDOBA				5,62	3.303,0
8	CÓRDOBA	FERNAN NUÑEZ	MONTEMAYOR	MONTILLA	LA RAMBLA	AGUILAR DE LA FRONTERA	NUEVA CARTEYA	ESPEJO	CÓRDOBA	7,08	7.650,4
9	CÓRDOBA	LA CARLOTA	LA RAMBLA	MONTILLA	MONTEMAYOR	ESPEJO	CÓRDOBA			5,57	6.412,5
10	CÓRDOBA	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	VILLANUEVA DE CÓRDOBA	MONTORO	VILLA DEL RÍO	BUJALANCE	CÓRDOBA			6,47	4.149,0
11	CÓRDOBA	VILLAHARTA	VILLANUEVA DE CÓRDOBA	MONTORO	ADAMUZ	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	CÓRDOBA			6,17	3.244,6
12	CÓRDOBA	BUJALANCE	VALENZUELA	VILLA DEL RÍO	MONTORO	ADAMUZ	VILLAHARTA	CÓRDOBA		7,15	4.019,2
13	CÓRDOBA	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	VILLANUEVA DE CÓRDOBA	ADAMUZ	VILLAHARTA	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	ALMODOBAR DEL RÍO	CÓRDOBA		8,57	4.880,8
14	CÓRDOBA	FERNAN NUÑEZ	LA RAMBLA	SANTAELLA	PALMA DEL RÍO	FUENTE PALMERA	LA CARLOTA	ALMODOBAR DEL RÍO	CÓRDOBA	7,40	10.772,6
15	CÓRDOBA	LA CARLOTA	FERNAN NUÑEZ	ALMODOBAR DEL RÍO	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	VILLAHARTA	CÓRDOBA			6,63	6.209,3
16	CÓRDOBA	BUJALANCE	PEDRO ABAD	MONTORO	ADAMUZ	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	CÓRDOBA			4,27	3.405,6
17	CÓRDOBA	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	ADAMUZ	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	ALMODOBAR DEL RÍO	FERNAN NUÑEZ	CÓRDOBA			6,97	4.735,9
18	CÓRDOBA	EL CARPIO	CASTRO DEL RÍO	BUJALANCE	MONTORO	ADAMUZ	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	CÓRDOBA		7,48	4.250,4
19	CÓRDOBA	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	VILLANUEVA DE CÓRDOBA	ADAMUZ	VILLAHARTA	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	CÓRDOBA			7,18	2.587,8
20	CÓRDOBA	SANTAELLA	PUENTE GENIL	AGUILAR DE LA FRONTERA	CABRA	MONTILLA	MONTEMAYOR	FERNAN NUÑEZ	CÓRDOBA	7,57	11.504,1

(Fuente: Elaboración propia)

Si nos fijamos, encontramos una ruta que se sale de los valores permitidos para el tiempo total de la ruta, 8 horas, pero aun así la hemos introducido en esta lista de

mejores rutas ya que no sobrepasa demasiado este valor y puede que más tarde en “mejora por Búsqueda Local” se convierta en una ruta cercana al óptimo.

- Rutas iniciales y “Búsqueda Local”:

Las rutas anteriores, contienen una buena cantidad de puntos limpios además de tener valores muy próximos a los límites fijados para las funciones objetivo, por lo que, en este caso, todas se han elegido para ser las rutas iniciales para el método de “Búsqueda Local”.

Una vez elegidas las rutas iniciales, que coinciden en este caso con las aleatorias, hemos realizado el método de Búsqueda Local, con el que hemos mejorado cada ruta, en caso de haber sido posible, buscando rutas vecinas. Hemos calculado las respectivas funciones objetivo y de las mejores, hemos elegido la que será la primera ruta final del problema.

Estos pasos, como es lógico, se han ido repitiendo, eliminando los puntos limpios que ya han sido asignados en las rutas finales obtenidas con anterioridad, hasta conseguir el total de rutas finales.

Una ruta vecina no es más que, una ruta que, en lugar de tener los nodos de la ruta original o inicial, tiene al menos uno distinto. Para nuestro problema usamos esta teoría de rutas vecinas con la restricción de que esos nodos distintos han de ser colindantes al anterior. Así no obtendremos nuevas rutas con nodos aleatorios, que formarían caminos con poco sentido.

Por tanto, hemos realizado la búsqueda de todas las rutas vecinas, de cada una de las rutas originales o iniciales, pero teniendo en cuenta los puntos limpios colindantes.

Evidentemente se obtiene un número de rutas muy elevado, por lo que presentamos solo las más relevantes y/o las que mejoran a las originales.

A continuación, se muestra una lista con estas rutas vecinas:

(MEJORES RUTAS POR BÚSQUEDA LOCAL. ORIGINALES Y VECINAS CÓRDOBA)

RUTAS		CÁLCULO DE RUTAS VECINAS A:										TOTAL TIEMPO HORAS	TOTAL CARGA LITROS
ORIGINAL	1	CÓRDOBA	FERNÁN NÚÑEZ	ESPEJO	MONTEMAYOR	MONTILLA	LA RAMBLA	SANTAELLA	LA CARLOTA	CÓRDOBA		6,97	8.177,9
MEJORES VECINAS	1	CÓRDOBA	CASTRO DEL RÍO	ESPEJO	FERNÁN NÚÑEZ	MONTEMAYOR	MONTILLA	LA RAMBLA	SANTAELLA	LA CARLOTA	CÓRDOBA	7,73	9.016,3
	2	CÓRDOBA	ALMODÓBAR DEL RÍO	FUENTE PALMERA	PALMA DEL RÍO	LA CARLOTA	SANTAELLA	LA RAMBLA	MONTEMAYOR	FERNÁN NÚÑEZ	CÓRDOBA	7,80	11.187,2
	3	CÓRDOBA	FERNÁN NÚÑEZ	MONTEMAYOR	MONTILLA	AGUILAR DE LA FRONTERA	MORILES	PUENTE GENIL	SANTAELLA	LA CARLOTA	CÓRDOBA	7,67	11.826,8
ORIGINAL	2	CÓRDOBA	CASTRO DEL RÍO	BAENA	PRIEGO DE CÓRDOBA	DOÑA MENCIA	NUEVA CARTEYA	ESPEJO	CÓRDOBA			7,02	7.747,0
MEJORES VECINAS	1	CÓRDOBA	VALENZUELA	BAENA	PRIEGO DE CÓRDOBA	DOÑA MENCIA	NUEVA CARTEYA	CASTRO DEL RÍO	ESPEJO	CÓRDOBA		8,06	7.870,8
ORIGINAL	3	CÓRDOBA	LA CARLOTA	FUENTE PALMERA	ALMODÓBAR DEL RÍO	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	CÓRDOBA					5,52	5.818,2
MEJORES VECINAS	1	CÓRDOBA	LA CARLOTA	FUENTE PALMERA	PALMA DEL RÍO	ALMODÓBAR DEL RÍO	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	VILLAHARTA	CÓRDOBA			7,22	8.625,3
	2	CÓRDOBA	LA CARLOTA	FUENTE PALMERA	PALMA DEL RÍO	ALMODÓBAR DEL RÍO	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	VILLANUEVA DEL REY	VILLAHARTA	CÓRDOBA		8,11	8.739,6
	3	CÓRDOBA	FERNÁN NÚÑEZ	SANTAELLA	LA CARLOTA	FUENTE PALMERA	PALMA DEL RÍO	ALMODÓBAR DEL RÍO	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	CÓRDOBA		8,21	9.848,0
ORIGINAL	4	CÓRDOBA	ESPEJO	NUEVA CARTEYA	MONTILLA	MONTEMAYOR	FERNÁN NÚÑEZ	CÓRDOBA				5,30	4.935,0
MEJORES VECINAS	1	CÓRDOBA	CASTRO DEL RÍO	ESPEJO	FERNÁN NÚÑEZ	MONTEMAYOR	MONTILLA	LA RAMBLA	SANTAELLA	LA CARLOTA	CÓRDOBA	7,73	9.016,3
	2	CÓRDOBA	ALMODÓBAR DEL RÍO	FUENTE PALMERA	PALMA DEL RÍO	LA CARLOTA	SANTAELLA	LA RAMBLA	MONTEMAYOR	FERNÁN NÚÑEZ	CÓRDOBA	7,80	11.187,2
	3	CÓRDOBA	FERNÁN NÚÑEZ	MONTEMAYOR	MONTILLA	AGUILAR DE LA FRONTERA	MORILES	PUENTE GENIL	SANTAELLA	LA CARLOTA	CÓRDOBA	7,67	11.826,8
ORIGINAL	5	CÓRDOBA	SANTAELLA	PUENTE GENIL	LA RAMBLA	LA CARLOTA	CÓRDOBA					5,28	7.056,4
MEJORES VECINAS	1	CÓRDOBA	CASTRO DEL RÍO	ESPEJO	FERNÁN NÚÑEZ	MONTEMAYOR	MONTILLA	LA RAMBLA	SANTAELLA	LA CARLOTA	CÓRDOBA	7,73	9.016,3
	2	CÓRDOBA	ALMODÓBAR DEL RÍO	FUENTE PALMERA	PALMA DEL RÍO	LA CARLOTA	SANTAELLA	LA RAMBLA	MONTEMAYOR	FERNÁN NÚÑEZ	CÓRDOBA	7,80	11.187,2
	3	CÓRDOBA	FERNÁN NÚÑEZ	MONTEMAYOR	MONTILLA	AGUILAR DE LA FRONTERA	MORILES	PUENTE GENIL	SANTAELLA	LA CARLOTA	CÓRDOBA	7,67	11.826,8
ORIGINAL	6	CÓRDOBA	BUJALANCE	MONTORO	ADAMUZ	VILLAHARTA	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	CÓRDOBA				6,32	3.645,0
MEJORES VECINAS	1	CÓRDOBA	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	EL CARPIO	PEDRO ABAD	BUJALANCE	VILLA DEL RÍO	MONTORO	ADAMUZ	VILLAHARTA	CÓRDOBA	7,90	5.195,8
ORIGINAL	7	CÓRDOBA	VILLAHARTA	VILLANUEVA DEL REY	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	ALMODÓBAR DEL RÍO	CÓRDOBA					5,62	3.303,0
MEJORES VECINAS	1	CÓRDOBA	VILLAHARTA	VILLANUEVA DEL DUQUE	HINOJOSA DEL DUQUE	PEÑARROYA- PUEBLONUEVO	BÉLMIZ	VILLANUEVA DEL REY	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	CÓRDOBA		7,47	4.431,9
	2	CÓRDOBA	VILLAHARTA	ALCARACEJOS	VILLANUEVA DEL DUQUE	PEÑARROYA- PUEBLONUEVO	BÉLMIZ	VILLANUEVA DEL REY	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	CÓRDOBA		8,01	4.713,1
ORIGINAL	8	CÓRDOBA	FERNÁN NÚÑEZ	MONTEMAYOR	MONTILLA	LA RAMBLA	AGUILAR DE LA FRONTERA	NUEVA CARTEYA	ESPEJO	CÓRDOBA		7,08	7.650,4
MEJORES VECINAS	1	CÓRDOBA	FERNÁN NÚÑEZ	MONTEMAYOR	LA RAMBLA	PUENTE GENIL	MORILES	AGUILAR DE LA FRONTERA	MONTILLA	ESPEJO	CÓRDOBA	7,92	10.918,6
	2	CÓRDOBA	FERNÁN NÚÑEZ	MONTEMAYOR	MONTILLA	AGUILAR DE LA FRONTERA	MORILES	LUCENA	CABRA	NUEVA CARTEYA	ESPEJO	8,28	13.718,4
ORIGINAL	9	CÓRDOBA	LA CARLOTA	LA RAMBLA	MONTILLA	MONTEMAYOR	ESPEJO	CÓRDOBA				7,08	7.650,4
MEJORES VECINAS	1	CÓRDOBA	LA CARLOTA	FUENTE PALMERA	PALMA DEL RÍO	ALMODÓBAR DEL RÍO	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	VILLAHARTA	CÓRDOBA			7,22	8.625,3
	2	CÓRDOBA	LA CARLOTA	FUENTE PALMERA	PALMA DEL RÍO	ALMODÓBAR DEL RÍO	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	VILLANUEVA DEL REY	VILLAHARTA	CÓRDOBA		8,11	8.739,6
	3	CÓRDOBA	FERNÁN NÚÑEZ	SANTAELLA	LA CARLOTA	FUENTE PALMERA	PALMA DEL RÍO	ALMODÓBAR DEL RÍO	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	CÓRDOBA		8,21	9.848,0
ORIGINAL	10	CÓRDOBA	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	VILLANUEVA DE CÓRDOBA	MONTORO	VILLA DEL RÍO	BUJALANCE	CÓRDOBA				6,47	4.149,0
MEJORES VECINAS	1	CÓRDOBA	EL CARPIO	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	ADAMUZ	PEDRO ABAD	MONTORO	VILLA DEL RÍO	BUJALANCE	VALENZUELA	CÓRDOBA	7,90	4.777,0
ORIGINAL	11	CÓRDOBA	VILLAHARTA	VILLANUEVA DE CÓRDOBA	MONTORO	ADAMUZ	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	CÓRDOBA				6,17	3.244,6
MEJORES VECINAS	1	CÓRDOBA	EL CARPIO	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	ADAMUZ	PEDRO ABAD	MONTORO	VILLA DEL RÍO	BUJALANCE	VALENZUELA	CÓRDOBA	7,90	4.777,0
ORIGINAL	12	CÓRDOBA	BUJALANCE	VALENZUELA	VILLA DEL RÍO	MONTORO	ADAMUZ	VILLAHARTA	CÓRDOBA			7,15	4.019,2
MEJORES VECINAS	1	CÓRDOBA	EL CARPIO	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	ADAMUZ	PEDRO ABAD	MONTORO	VILLA DEL RÍO	BUJALANCE	VALENZUELA	CÓRDOBA	7,90	4.777,0
ORIGINAL	13	CÓRDOBA	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	VILLANUEVA DE CÓRDOBA	ADAMUZ	VILLAHARTA	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	ALMODÓBAR DEL RÍO	CÓRDOBA			8,60	4.880,8
MEJORES VECINAS	1	CÓRDOBA	EL CARPIO	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	ADAMUZ	PEDRO ABAD	MONTORO	VILLA DEL RÍO	BUJALANCE	VALENZUELA	CÓRDOBA	7,90	4.777,0
ORIGINAL	14	CÓRDOBA	FERNÁN NÚÑEZ	LA RAMBLA	SANTAELLA	PALMA DEL RÍO	FUENTE PALMERA	LA CARLOTA	ALMODÓBAR DEL RÍO	CÓRDOBA		7,40	10.772,6
MEJORES VECINAS	1	CÓRDOBA	CASTRO DEL RÍO	ESPEJO	FERNÁN NÚÑEZ	MONTEMAYOR	MONTILLA	LA RAMBLA	SANTAELLA	LA CARLOTA	CÓRDOBA	7,73	9.016,3
	2	CÓRDOBA	ALMODÓBAR DEL RÍO	FUENTE PALMERA	PALMA DEL RÍO	LA CARLOTA	SANTAELLA	LA RAMBLA	MONTEMAYOR	FERNÁN NÚÑEZ	CÓRDOBA	7,80	11.187,2
	3	CÓRDOBA	FERNÁN NÚÑEZ	MONTEMAYOR	MONTILLA	AGUILAR DE LA FRONTERA	MORILES	PUENTE GENIL	SANTAELLA	LA CARLOTA	CÓRDOBA	7,67	11.826,8
ORIGINAL	15	CÓRDOBA	LA CARLOTA	FERNÁN NÚÑEZ	ALMODÓBAR DEL RÍO	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	VILLAHARTA	CÓRDOBA				6,63	6.209,3
MEJORES VECINAS	1	CÓRDOBA	FERNÁN NÚÑEZ	LA CARLOTA	PALMA DEL RÍO	FUENTE PALMERA	ALMODÓBAR DEL RÍO	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	VILLAHARTA	CÓRDOBA		8,20	9.747,1
ORIGINAL	16	CÓRDOBA	BUJALANCE	PEDRO ABAD	MONTORO	ADAMUZ	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	CÓRDOBA				5,23	3.405,6
MEJORES VECINAS	1	CÓRDOBA	EL CARPIO	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	ADAMUZ	PEDRO ABAD	MONTORO	VILLA DEL RÍO	BUJALANCE	VALENZUELA	CÓRDOBA	7,90	4.777,0
ORIGINAL	17	CÓRDOBA	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	ADAMUZ	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	ALMODÓBAR DEL RÍO	FERNÁN NÚÑEZ	CÓRDOBA				6,97	4.735,9
MEJORES VECINAS	1	CÓRDOBA	EL CARPIO	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	ADAMUZ	PEDRO ABAD	MONTORO	VILLA DEL RÍO	BUJALANCE	VALENZUELA	CÓRDOBA	7,90	4.777,0
ORIGINAL	18	CÓRDOBA	EL CARPIO	CASTRO DEL RÍO	BUJALANCE	MONTORO	ADAMUZ	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	CÓRDOBA			7,48	4.250,4
MEJORES VECINAS	1	CÓRDOBA	EL CARPIO	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	ADAMUZ	PEDRO ABAD	MONTORO	VILLA DEL RÍO	BUJALANCE	VALENZUELA	CÓRDOBA	7,90	4.777,0
ORIGINAL	19	CÓRDOBA	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	VILLANUEVA DE CÓRDOBA	ADAMUZ	VILLAHARTA	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	CÓRDOBA				7,18	2.587,8
MEJORES VECINAS	1	CÓRDOBA	EL CARPIO	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	ADAMUZ	PEDRO ABAD	MONTORO	VILLA DEL RÍO	BUJALANCE	VALENZUELA	CÓRDOBA	7,90	4.777,0
ORIGINAL	20	CÓRDOBA	SANTAELLA	PUENTE GENIL	AGUILAR DE LA FRONTERA	CABRA	MONTILLA	MONTEMAYOR	FERNÁN NÚÑEZ	CÓRDOBA		7,57	11.504,1
MEJORES VECINAS	1	CÓRDOBA	CASTRO DEL RÍO	ESPEJO	FERNÁN NÚÑEZ	MONTEMAYOR	MONTILLA	LA RAMBLA	SANTAELLA	LA CARLOTA	CÓRDOBA	7,73	9.016,3
	2	CÓRDOBA	ALMODÓBAR DEL RÍO	FUENTE PALMERA	PALMA DEL RÍO	LA CARLOTA	SANTAELLA	LA RAMBLA	MONTEMAYOR	FERNÁN NÚÑEZ	CÓRDOBA	7,80	11.187,2
	3	CÓRDOBA	FERNÁN NÚÑEZ	MONTEMAYOR	MONTILLA	AGUILAR DE LA FRONTERA	MORILES	PUENTE GENIL	SANTAELLA	LA CARLOTA	CÓRDOBA	7,67	11.826,8

(Fuente: Elaboración propia)

Observamos como muchas rutas vecinas aparecen repetidas, señaladas a la izquierda en color anaranjado. Esto se debe a que en algunos casos las originales comparten varios nodos y sus vecinas acaban siendo iguales. Estas duplicaciones se eliminan más adelante.

En algunos casos los valores de las funciones objetivo de las rutas vecinas sobrepasan los límites levemente, marcadas en rojo en la parte derecha de la tabla, en la columna correspondiente al tiempo y a la carga.

Cabe destacar como el proceso de búsqueda de vecinas por búsqueda local ha mejorado sustancialmente las rutas originales en casi todos los casos. En la tabla anterior se puede comprobar como los totales de tiempo y de carga de las rutas vecinas, respecto de las originales, aumentan sin sobrepasar los límites, excepto en algunos casos que se produce de forma leve. Por lo tanto, las originales han sido mejoradas por las vecinas; transportan más aceite, mayor carga del vehículo, y se aumenta el número total de puntos visitados en la misma ruta.

Para seguir con la resolución, hemos eliminado las rutas duplicadas y hemos seleccionado las mejores, las más destacadas de la tabla anterior, quedándonos por tanto con las que se muestran seguidamente:

(MEJORES RUTAS POR B.L., QUITANDO REPETIDAS Y NO VÁLIDAS, CON ORIGINALES Y VECINAS. CÓRDOBA)

RUTAS		MEJORES RUTAS, VECINAS A:									TOTAL TIEMPO HORAS	TOTAL CARGA LITROS	
ORIGINAL	1	CÓRDOBA	FERNAN NUÑEZ	ESPEJO	MONTEMAYOR	MONTILLA	LA RAMBLA	SANTAELLA	LA CARLOTA	CÓRDOBA	6,97	8.177,9	
MEJOR VECINA	2	CÓRDOBA	ALMODÓBAR DEL RÍO	FUENTE PALMERA	PALMA DEL RÍO	LA CARLOTA	SANTAELLA	LA RAMBLA	MONTEMAYOR	FERNÁN NUÑEZ	CÓRDOBA	7,80	11.187,2
ORIGINAL	2	CÓRDOBA	CASTRO DEL RÍO	BAENA	PRIEGO DE CÓRDOBA	DOÑA MENCIA	NUEVA CARTEYA	ESPEJO	CÓRDOBA		7,02	7.747,0	
MEJOR VECINA	1	CÓRDOBA	VALENZUELA	BAENA	PRIEGO DE CÓRDOBA	DOÑA MENCIA	NUEVA CARTEYA	CASTRO DEL RÍO	ESPEJO	CÓRDOBA	8,06	7.870,8	
ORIGINAL	3	CÓRDOBA	LA CARLOTA	FUENTE PALMERA	ALMODÓBAR DEL RÍO	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	CÓRDOBA				5,52	5.818,2	
MEJOR VECINA	2	CÓRDOBA	LA CARLOTA	FUENTE PALMERA	PALMA DEL RÍO	ALMODÓBAR DEL RÍO	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	VILLANUEVA DEL REY	VILLAHARTA	CÓRDOBA	8,11	8.739,6	
ORIGINAL	6	CÓRDOBA	BUJALANCE	MONTORO	ADAMUZ	VILLAHARTA	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	CÓRDOBA			6,32	3.645,0	
MEJOR VECINA	1	CÓRDOBA	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	EL CARPIO	PEDRO ABAD	BUJALANCE	VILLA DEL RÍO	MONTORO	ADAMUZ	VILLAHARTA	CÓRDOBA	7,90	5.195,8
ORIGINAL	7	CÓRDOBA	VILLAHARTA	VILLANUEVA DEL REY	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	ALMODÓBAR DEL RÍO	CÓRDOBA				5,62	3.303,0	
MEJOR VECINA	2	CÓRDOBA	VILLAHARTA	ALCARACEJOS	VILLANUEVA DEL DUQUE	HINOJOSA DEL DUQUE	PEÑARROYA- PUEBLONUEVO	BÉLMEZ	VILLANUEVA DEL REY	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	CÓRDOBA	8,01	4.713,1
ORIGINAL	8	CÓRDOBA	FERNÁN NUÑEZ	MONTEMAYOR	MONTILLA	LA RAMBLA	AGUILAR DE LA FRONTERA	NUEVA CARTEYA	ESPEJO	CÓRDOBA	7,08	7.650,4	
MEJOR VECINA	1	CÓRDOBA	FERNÁN NUÑEZ	MONTEMAYOR	LA RAMBLA	PUNTE GENIL	MORILES	AGUILAR DE LA FRONTERA	MONTILLA	ESPEJO	CÓRDOBA	7,92	10.918,6
ORIGINAL	10	CÓRDOBA	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	VILLANUEVA DE CÓRDOBA	MONTORO	VILLA DEL RÍO	BUJALANCE	CÓRDOBA			6,47	4.149,0	
MEJOR VECINA	1	CÓRDOBA	EL CARPIO	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	ADAMUZ	PEDRO ABAD	MONTORO	VILLA DEL RÍO	BUJALANCE	VALENZUELA	CÓRDOBA	7,90	4.777,0
ORIGINAL	15	CÓRDOBA	LA CARLOTA	FERNÁN NUÑEZ	ALMODÓBAR DEL RÍO	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	VILLAHARTA	CÓRDOBA			6,63	6.209,3	
MEJOR VECINA	1	CÓRDOBA	FERNÁN NUÑEZ	LA CARLOTA	PALMA DEL RÍO	FUENTE PALMERA	ALMODÓBAR DEL RÍO	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	VILLAHARTA	CÓRDOBA	8,20	9.747,1	

(Fuente: Elaboración propia)

Señalamos que, aunque algunas rutas sobrepasan de nuevo el límite de tiempo de 8 horas, levemente, 3, 6 y 12 minutos, por lo que, las dejamos como posibles rutas finales ya que tenemos margen hasta 9 horas que es lo permitido, legalmente, en tiempo de conducción para nuestro vehículo.

En el mapa que aparece más adelante, hemos representando las rutas que hasta ahora hemos conseguido, para determinar cuál/es son las más apropiadas para nuestro problema. Para la elección de la mejor/es rutas finales, se han tenido en cuenta otros factores importantes aparte de las funciones objetivo, como por ejemplo el no dejar puntos limpios aislados, ya que nos encontraríamos más tarde con una ruta que realiza un desplazamiento muy elevado, solo para llegar hasta ese punto.

La elección de la mejor/es rutas es más sencilla si las visualizamos.

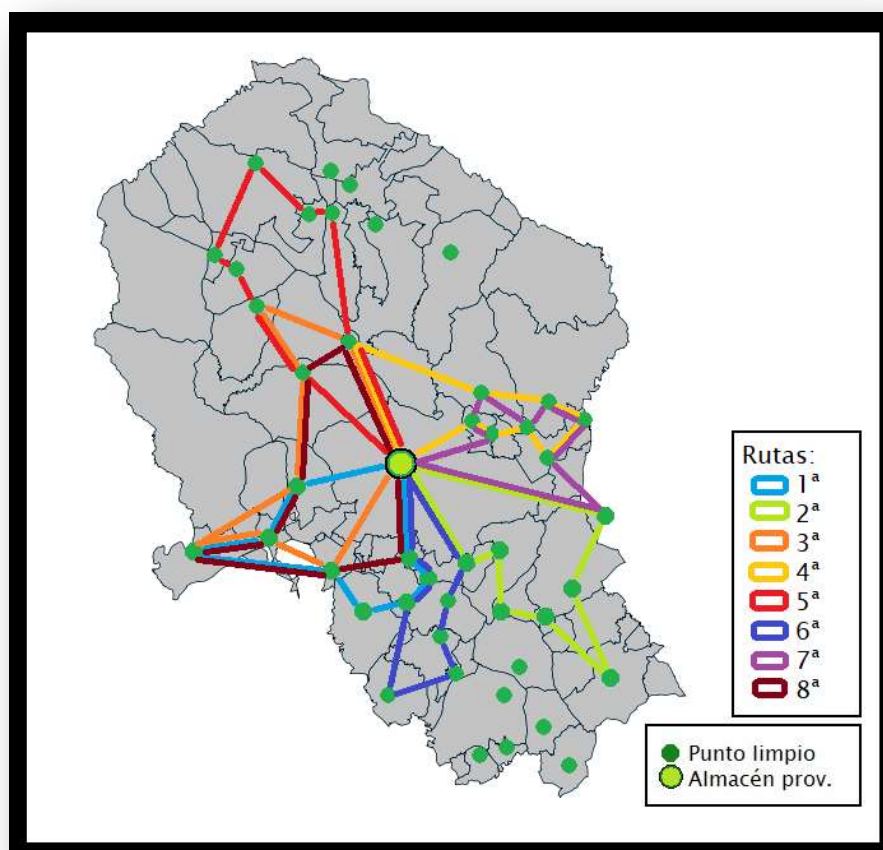
Para representarlas en un mapa, hemos eliminado las originales que han sido mejoradas, o las vecinas que no han mejorado a la ruta original. Finalmente, estas han sido las rutas finales a tener en cuenta:

(MEJORES RUTAS EN BÚSQUEDA DE RUTA/A FINALES POR BÚSQUEDA LOCAL. CÓRDOBA)

RUTAS		MEJORES RUTAS POR BUSQUEDA LOCAL										TOTAL TIEMPO HORAS	TOTAL CARGA LITROS
VECINA	2	CÓRDOBA	ALMODÓBAR DEL RÍO	FUENTE PALMERA	PALMA DEL RÍO	LA CARLOTA	SANTAELLA	LA RAMBLA	MONTEMAYOR	FERNÁN NÚÑEZ	CÓRDOBA	7,80	11.187,2
VECINA	1	CÓRDOBA	VALENZUELA	BAENA	PRIEGO DE CÓRDOBA	DOÑA MENCIA	NUEVA CARTEYA	CASTRO DEL RÍO	ESPEJO	CÓRDOBA		8,06	7.870,8
VECINA	2	CÓRDOBA	LA CARLOTA	FUENTE PALMERA	PALMA DEL RÍO	ALMODÓBAR DEL RÍO	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	VILLANUEVA DEL REY	VILLAHARTA	CÓRDOBA		8,11	8.739,6
VECINA	1	CÓRDOBA	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	EL CARPIO	PEDRO ABAD	BUJALANCE	VILLA DEL RÍO	MONTORO	ADAMUZ	VILLAHARTA	CÓRDOBA	7,90	5.195,8
VECINA	2	CÓRDOBA	VILLAHARTA	ALCARACEJOS	VILLANUEVA DEL DUQUE	HINOJOSA DEL DUQUE	PEÑARROYA- PUEBLONUEVO	BÉLMEZ	VILLANUEVA DEL REY	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	CÓRDOBA	8,01	4.713,1
VECINA	1	CÓRDOBA	FERNÁN NÚÑEZ	MONTEMAYOR	LA RAMBLA	PUENTE GENIL	MORILES	AGUILAR DE LA FRONTERA	MONTILLA	ESPEJO	CÓRDOBA	7,92	10.918,6
VECINA	1	CÓRDOBA	EL CARPIO	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	ADAMUZ	PEDRO ABAD	MONTORO	VILLA DEL RÍO	BUJALANCE	VALENZUELA	CÓRDOBA	7,90	4.777,0
VECINA	1	CÓRDOBA	FERNÁN NÚÑEZ	LA CARLOTA	PALMA DEL RÍO	FUENTE PALMERA	ALMODÓBAR DEL RÍO	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	VILLAHARTA	CÓRDOBA		8,20	9.747,1

(Fuente: Elaboración propia)

(MAPA MEJORES RUTAS DE BÚSQUEDA LOCAL. CÓRDOBA)



(Fuente: Elaboración propia)

Basándonos en los datos y teniendo en cuenta los anteriores factores, la primera, la segunda, y la quinta ruta son las mejores y, por tanto, las hemos elegido como rutas finales para el problema. Realmente en esta fase deberíamos de elegir tan solo una ruta final, la mejor de ellas, y una vez elegida, el proceso anterior completo, se repite para obtener la siguiente ruta final. No obstante, repetir el proceso daría en teoría los mismos resultados, por lo que hemos escogido 3 rutas finales que además se complementan perfectamente, no interfieren la una con la otra, y por tanto, se pueden omitir los pasos iniciales y aprovechar estas rutas.

Las rutas finales obtenidas hasta el momento y, por tanto, cercanas a las óptimas aparecen a continuación.

(RUTAS FINALES ELEGIDAS EN PRIMERA FASE. CÓRDOBA)

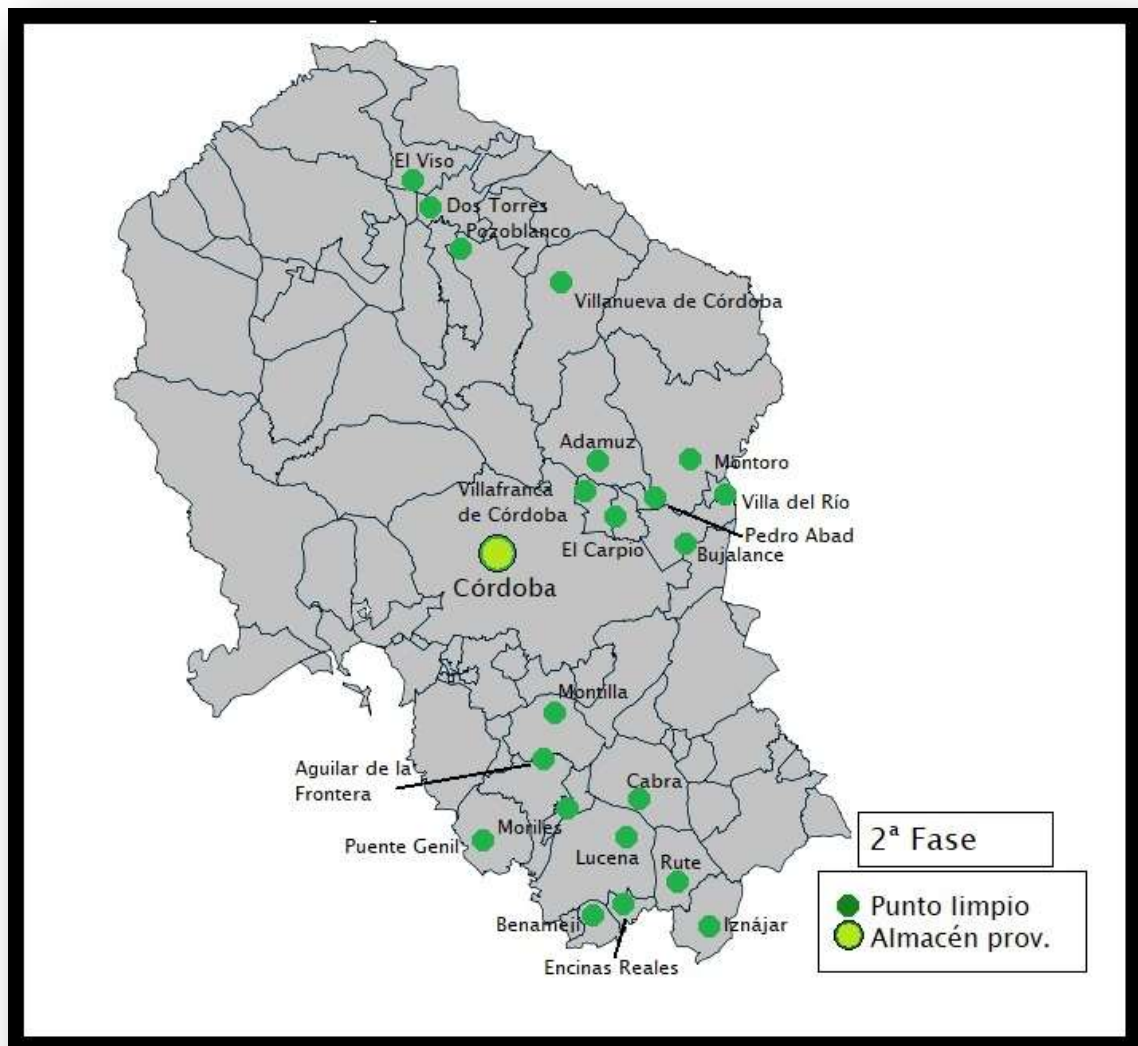
RUTAS	RUTAS FINALES 1ª PARTE										TOTAL TIEMPO HORAS	TOTAL CARGA LITROS
1	CÓRDOBA	ALMODÓBAR DEL RÍO	FUENTE PALMERA	PALMA DEL RÍO	LA CARLOTA	SANTAELLA	LA RAMBLA	MONTEMAYOR	FERNÁN NÚÑEZ	CÓRDOBA	7,8	11.187,2
2	CÓRDOBA	VALENZUELA	BAENA	PRIEGO DE CÓRDOBA	DOÑA MENCIA	NUEVA CARTEYA	CASTRO DEL RÍO	ESPEJO	CÓRDOBA		8,06	7.870,8
5	CÓRDOBA	VILLAHARTA	ALCARACEJOS	VILLANUEVA DEL DUQUE	HINOJOSA DEL DUQUE	PEÑARROYA-PUEBLONUEVO	BÉLMEZ	VILLANUEVA DEL REY	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	CÓRDOBA	8,01	4.713,1

(Fuente: Elaboración propia)

Tras eliminar los puntos limpios que ya tienen ruta final del algoritmo propio inicial, el proceso de obtención de rutas finales se repite tal cual hemos expuesto anteriormente. En este caso se ha modificado levemente el algoritmo propio para adecuarse a los 23 nodos restantes que quedan en el problema.

El mapa tras la eliminación de los nodos ya enrutados, quedaría así:

(MAPA CÓRDOBA, 2ª FASE CON ELIMINACIÓN DE NODOS YA ENRUTADOS)



(Fuente: Elaboración propia)

Para obtener las rutas finales en esta segunda parte del problema, hemos empezado como es lógico por la creación de rutas con nuestro algoritmo propio, hemos descartado las que se parecían entre sí, ya que más tarde se obtendrán de ellas las mismas rutas vecinas, las hemos mejorado mediante búsqueda local, hemos elegido las mejores de estas, y finalmente las que mejor se adaptan a nuestra provincia para la resolución del problema han sido escogidas para ser rutas finales junto con las obtenidas anteriormente. A continuación, se muestran estas 3 últimas rutas finales.

(RUTAS FINALES, TRAS OBTENCIÓN POR ALG. Y MEJORA CON BÚSQUEDA L. CÓRDOBA)

RUTA	MEJORES RUTAS POR ALG. PROPIO Y MEJORAS. 2ª FASE									TOTAL TIEMPO HORAS	TOTAL CARGA LITROS
2	CÓRDOBA	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	ADAMUZ	MONTORO	VILLANUEVA DE CÓRDOBA	POZOBLANCO	DOS TORRES	EL VISO	CÓRDOBA	7,58	5.638,9
3	CÓRDOBA	EL CARPIO	PEDRO ABAD	VILLA DEL RÍO	BUJALANCE	CABRA	MORILES	MONTILLA	CÓRDOBA	7,80	7.934,0
7	CÓRDOBA	AGUILAR DE LA FRONTERA	LUCENA	RUTE	IZNÁJAR	ENCINAS REALES	BENAMEJÍ	PUENTE GENIL	CÓRDOBA	8,25	11.681,0

(Fuente: Elaboración propia)

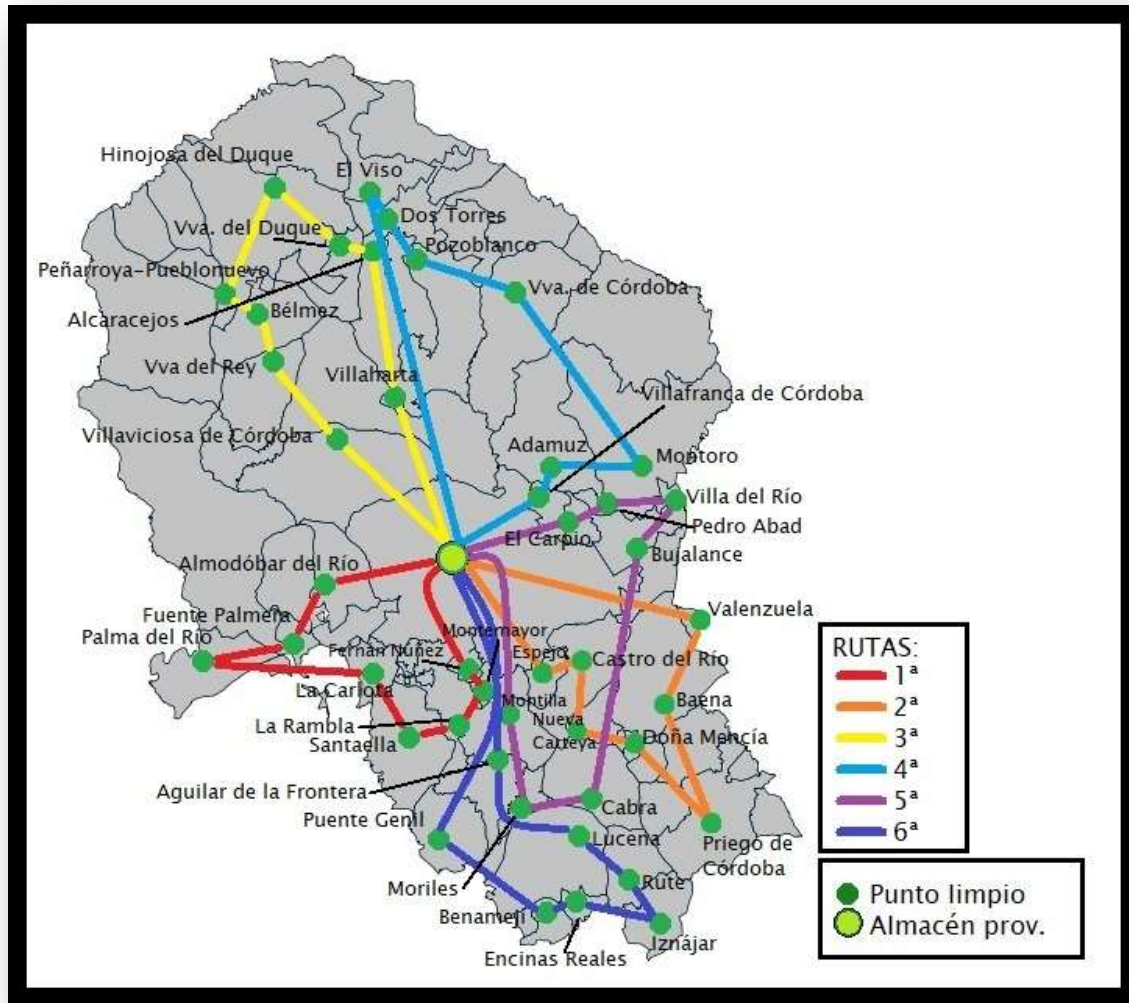
Con estas últimas rutas se completa el problema y se da solución al VRP para el conjunto completo de puntos limpios en Córdoba. No obstante, la última ruta sobrepasa en 0.25 horas (15 minutos) el límite impuesto de tiempo de conducción, pero el tiempo de conducción para los vehículos es de 9 horas por lo que la ruta sigue siendo válida. Seguidamente se complementa la resolución final del problema con todas las rutas finales, solución al enrutamiento, y el mapa con las respectivas rutas para visualizarlas de forma clara.

(RUTAS FINALES DEL VRP PARA CÓRDOBA)

RUTAS FINALES CÓRDOBA											TOTAL TIEMPO HORAS	TOTAL CARGA LITROS
1	CÓRDOBA	ALMODÓBAR DEL RÍO	FUENTE PALMERA	PALMA DEL RÍO	LA CARLOTA	SANTAELLA	LA RAMBLA	MONTEMAYOR	FERNÁN NÚÑEZ	CÓRDOBA	7,80	11.187,2
2	CÓRDOBA	VALENZUELA	BAENA	PRIEGO DE CÓRDOBA	DOÑA MENCÍA	NUEVA CARTEYA	CASTRO DEL RÍO	ESPEJO	CÓRDOBA		8,06	7.870,8
3	CÓRDOBA	VILLAHARTA	ALCARACEJOS	VILLANUEVA DEL DUQUE	HINOJOSA DEL DUQUE	PEÑARROYA- PUEBLONUEVO	BÉLMEZ	VILLANUEVA DEL REY	VILLAVICIOSA DE CÓRDOBA	CÓRDOBA	8,01	4.713,1
4	CÓRDOBA	VILLAFRANCA DE CÓRDOBA	ADAMUZ	MONTORO	VILLANUEVA DE CÓRDOBA	POZOBLANCO	DOS TORRES	EL VISO	CÓRDOBA		7,58	5.638,9
5	CÓRDOBA	EL CARPIO	PEDRO ABAD	VILLA DEL RÍO	BUJALANCE	CABRA	MORILES	MONTILLA	CÓRDOBA		7,80	7.934,0
6	CÓRDOBA	AGUILAR DE LA FRONTERA	LUCENA	RUTE	IZNÁJAR	ENCINAS REALES	BENAMEJÍ	PUENTE GENIL	CÓRDOBA		8,25	11.681,0

(Fuente: Elaboración propia)

(MAPA DE RUTAS FINALES DEL VRP PARA CÓRDOBA)



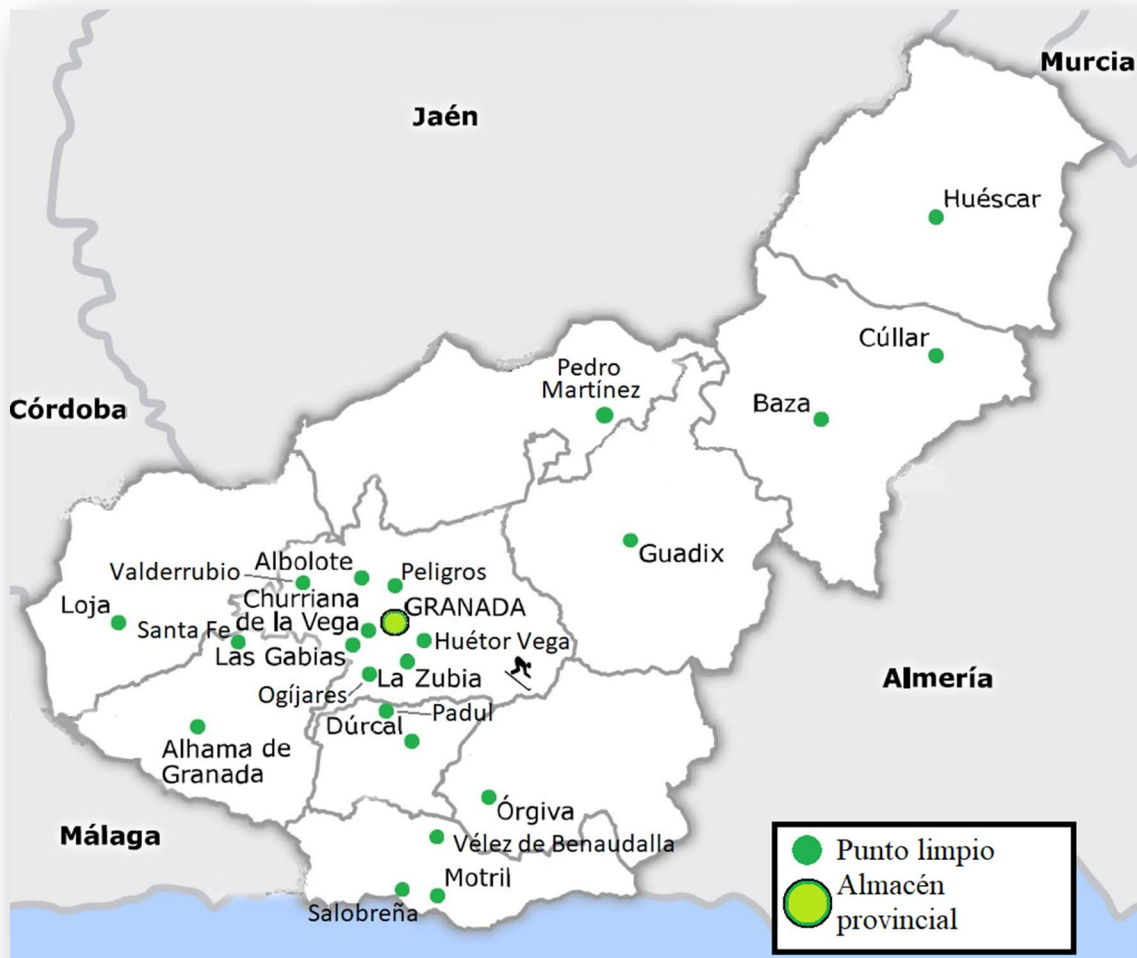
(Fuente: Elaboración propia)

5.2. EL VRP PARA GRANADA:

La provincia de Granada cuenta con un total de 174 municipios de los que 23 cuentan con punto limpio. Para este problema, al igual que con la provincia anterior, se han estimado las distintas cifras de reciclaje de aceite que se lleva a cabo por la población de este territorio. Además, se han estimado las localizaciones de este, en los diferentes puntos de reciclaje. Por consiguiente, tenemos las cantidades estimadas de aceite que se encuentran en los 23 puntos del problema y que aparecen en la sección de “datos”, más adelante, en su respectiva tabla.

A continuación, se muestra el mapa de la zona de Granada, con los diferentes puntos limpios y sus localizaciones geográficas, así como el almacén principal para esta provincia.

Mapa puntos limpios Granada



(Fuente: Elaboración propia)

➤ Datos utilizados para el VRP en Granada:

Los datos necesarios para realizar la resolución del VRP de Granada se presentan a continuación en forma de tablas y matrices, al igual que en el caso anterior. Primeramente, se muestran las distancias entre puntos limpios en la matriz de estas, seguidamente se presentan las cantidades de aceite por puntos limpios y por municipios en la siguiente tabla y por último se da la tabla de puntos limpios y sus colindantes, necesaria para la realización de rutas aleatorias mediante el algoritmo propio.

- Matriz de distancias entre puntos limpios, con estimación de tiempo de carga incluido:

Matriz de distancias, Granada

DISTANCIA HORAS CON 0,5 h. (CARGA)		Albolote	Alhama de Granada	Baza	Churriana de la Vega	Cúllar	Dúrcal	Granada	Guadix	Huésca	Huétor Vega	La Zubia	Las Gábias	Loja	Motril	Ogijares	Órgiva	Padul	Pedro Martínez	Peligros	Salobreña	Santa Fe	Valderrubio	Vélez de Benaudalla
1	Albolote	0	1,2	1,6	0,8	1,8	5,8	0,9	1,2	2,3	0,8	0,8	0,9	1,2	1,4	0,5	1,5	1,0	1,4	0,7	1,4	0,8	0,9	1,3
2	Alhama de Granada	1,2	0	2,1	1,3	2,3	1,6	1,3	1,7	2,9	1,3	1,3	1,4	1,1	2,1	1,4	2,0	1,6	1,9	1,2	2,0	1,2	1,1	1,9
3	Baza	1,6	2,1	0	1,8	0,9	2,0	1,7	1,1	1,5	1,8	1,8	1,8	2,1	2,3	1,7	2,4	1,9	1,4	1,5	2,3	1,7	1,8	2,2
4	Churriana de la Vega	0,8	1,3	1,8	0	1,9	1,0	0,8	1,3	2,5	0,8	0,8	0,7	1,3	1,4	0,8	1,4	0,9	1,6	0,8	1,4	0,9	1,1	1,2
5	Cúllar	1,8	2,3	0,9	1,9	0	2,2	1,9	1,3	1,2	2,0	2,0	2,0	2,3	2,5	1,9	2,5	2,1	1,6	1,7	2,5	1,9	2,0	2,4
6	Dúrcal	5,8	1,6	2,0	1,0	2,2	0	1,0	1,6	2,7	0,9	0,9	1,0	1,6	1,1	0,9	1,1	0,7	1,8	1,0	1,1	1,1	1,3	0,9
7	Granada	0,9	1,3	1,7	0,8	1,9	1,0	0	1,3	2,4	0,9	0,8	0,9	1,3	1,4	0,8	1,4	1,0	1,5	0,8	1,4	0,9	1,1	1,3
8	Guadix	1,2	1,7	1,1	1,3	1,3	1,6	1,3	0	1,8	1,3	1,3	1,4	1,7	1,9	1,3	2,0	1,5	1,1	1,2	1,9	1,3	1,4	1,8
9	Huésca	2,3	2,9	1,5	2,5	1,2	2,7	2,4	1,8	0	2,5	2,5	2,6	2,8	3,1	2,5	3,1	2,7	2,2	2,3	3,1	2,5	2,6	3,0
10	Huétor Vega	0,8	1,3	1,8	0,8	2,0	0,9	0,9	1,3	2,5	0	0,7	0,8	1,3	1,3	0,7	1,4	0,9	1,6	0,8	1,3	0,9	1,1	1,2
11	La Zubia	0,8	1,3	1,8	0,8	2,0	0,9	0,8	1,3	2,5	0,7	0	0,8	1,3	1,3	0,7	1,4	0,9	1,6	0,8	1,3	0,9	1,1	1,2
12	Las Gábias	0,9	1,4	1,8	0,7	2,0	1,0	0,9	1,4	2,6	0,8	0,8	0	1,3	1,4	0,8	1,4	0,9	1,6	0,9	1,3	0,9	1,1	1,2
13	Loja	1,2	1,1	2,1	1,3	2,3	1,6	1,3	1,7	2,8	1,3	1,3	1,3	0	1,9	1,3	1,9	1,5	1,9	1,2	1,9	1,1	1,0	1,8
14	Motril	1,4	2,1	2,3	1,4	2,5	1,1	1,4	1,9	3,1	1,3	1,3	1,4	1,9	0	1,2	1,1	1,1	2,1	1,4	0,8	1,4	1,6	0,8
15	Ogijares	0,5	1,4	1,7	0,8	1,9	0,9	0,8	1,3	2,5	0,7	0,7	0,8	1,3	1,2	0	1,3	0,8	1,5	0,8	1,2	0,9	1,1	1,1
16	Órgiva	1,5	2,0	2,4	1,4	2,5	1,1	1,4	2,0	3,1	1,4	1,4	1,4	1,9	1,1	1,3	0	1,2	2,2	0,8	1,1	1,5	1,7	1,0
17	Padul	1,0	1,6	1,9	0,9	2,1	0,7	1,0	1,5	2,7	0,9	0,9	0,9	1,5	1,1	0,8	1,2	0	1,7	0,9	1,1	1,0	1,2	1,0
18	Pedro Martínez	1,4	1,9	1,4	1,6	1,6	1,8	1,5	1,1	2,2	1,6	1,6	1,6	1,9	2,1	1,5	2,2	1,7	0	1,4	2,1	1,5	1,6	2,0
19	Peligros	0,7	1,2	1,5	0,8	1,7	1,0	0,8	1,2	2,3	0,8	0,8	0,9	1,2	1,4	0,8	0,8	0,9	1,4	0	1,4	0,8	0,9	1,3
20	Salobreña	1,4	2,0	2,3	1,4	2,5	1,1	1,4	1,9	3,1	1,3	1,3	1,3	1,9	0,8	1,2	1,1	1,1	2,1	1,4	0	1,4	1,6	0,8
21	Santa Fe	0,8	1,2	1,7	0,9	1,9	1,1	0,9	1,3	2,5	0,9	0,9	0,9	1,1	1,4	0,9	1,5	1,0	1,5	0,8	1,4	0	0,8	1,3
22	Valderrubio	0,9	1,1	1,8	1,1	2,0	1,3	1,1	1,4	2,6	1,1	1,1	1,1	1,0	1,6	1,1	1,7	1,2	1,6	0,9	1,6	0,8	0	1,5
23	Vélez de Benaudalla	1,3	1,9	2,2	1,2	2,4	0,9	1,3	1,8	3,0	1,2	1,2	1,2	1,8	0,8	1,1	1,0	1,0	2,0	1,3	0,8	1,3	1,5	0

(Fuente: elaboracion propia)

- Matriz de puntos limpios vecinos o colindantes:

MATRIZ DIVIDIDA DE VECINDAD DE PUNTOS LIMPIOS

PUNTOS LIMPIOS COLINDANTES	Albolote	Alhama de Granada	Baza	Churriana de la Vega	Cúllar	Dúrcal	Granada	Guadix	Huéscar	Huétor Vega	La Zubia	Las Gabias
	Valderrubio	Loja	Cúllar	Valderrubio	Huéscar	Alhama de Granada	Peligros	Granada	Cúllar	Guadix	Huétor Vega	Churriana de la Vega
	Peligros	Santa Fe	Pedro Martínez	Albolote	Baza	Padul	Albolote	Peligros		Granada	Churriana de la Vega	La Zubia
	Granada	Ogijares	Guadix	Peligros		Órgiva	Churriana de la Vega	Pedro Martínez		La Zubia	Las Gabias	Ogijares
	Churriana de la Vega	Padul		Granada		Vélez de Benaudalla	La Zubia	Baza			Ogijares	Santa Fe
PUNTOS LIMPIOS COLINDANTES		Dúrcal		La Zubia			Huétor Vega	Órgiva			Padul	
		Salobreña		Las Gabias			Guadix	Huétor Vega				

PUNTOS LIMPIOS COLINDANTES	Loja	Motril	Ogijares	Órgiva	Padul	Pedro Martínez	Peligros	Salobreña	Santa Fe	Valderrubio	Vélez de Benaudalla
	Alhama de Granada	Salobreña	Padul	Vélez de Benaudalla	Dúrcal	Baza	Pedro Martínez	Motril	Loja	Albolote	Motril
	Santa Fe	Vélez de Benaudalla	La Zubia	Dúrcal	La Zubia	Guadix	Guadix	Vélez de Benaudalla	Alhama de Granada	Churriana de la Vega	Salobreña
	Valderrubio		Las Gabias	Guadix	Ogijares	Peligros	Granada	Alhama de Granada	Las Gabias	Santa Fe	Órgiva
			Alhama de Granada		Alhama de Granada		Churriana de la Vega		Valderrubio	Loja	Dúrcal
PUNTOS LIMPIOS COLINDANTES							Albolote				

(Fuente: Elaboración propia)

➤ Rutas iniciales a partir del algoritmo propio, para Granada:

Como en el VRP anterior, mediante el algoritmo propio se han realizado rutas aleatorias, en este caso, se han realizado 10 repeticiones de 1500 rutas cada una para conseguir las 10 mejores rutas teniendo en cuenta las variables de tiempo de ruta, carga, mayor número posible de puntos visitados, etc., entre otros factores.

Se han seleccionado 21 rutas a tener en cuenta, y aunque algunas no resultan factibles, por no incluirse dentro de los valores permitidos de las variables o por salirse de las restricciones, se han incluido en esta primera selección ya que estos valores no permitidos solo se dan por el último/s puntos limpios y es posible que mejoren más adelante en la parte de “Búsqueda Local”.

Se pueden visualizar estos valores en color rojizo, en la siguiente tabla de rutas, y también como estas se presentan con muchas posibilidades de llegar a ser rutas finales del problema después de realizar algún cambio.

HOJA DE RUTAS PRIMERA SELECCIÓN (GRANADA)

PRIMERA SELECCIÓN DE RUTAS (ALGORITMO PROPIO CON ALEATORIEDAD Y VECINDAD)										TIEMPO TOTAL (HORAS)	CARGA TOTAL (LITROS)	
1	GRANADA	LA ZUBIA	PADUL	OGÍJARES	ALHAMA DE GRANADA	LOJA	VALDERRUBIO	ALBOLOTE	GRANADA	7,73	26.267,90	
2	GRANADA	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	CHURRIANA DE LA VEGA	LAS GABIAS	SANTA FE	GRANADA			5,22	23.673,10	
3	GRANADA	HUÉTOR VEGA	GUADIX	BAZA	PEDRO MARTÍNEZ	PELIGROS	GRANADA			6,85	15.117,40	
4	GRANADA	PELIGROS	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	SANTA FE	LOJA	GRANADA			5,58	23.135,30	
5	GRANADA	ALBOLOTE	CHURRIANA DE LA VEGA	LAS GABIAS	SANTA FE	VALDERRUBIO	GRANADA			5,15	23.673,10	
6	GRANADA	PELIGROS	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	SANTAFE	LAS GABIAS	GRANADA			4,92	25.654,80	
7	GRANADA	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	LOJA	ALHAMA DE GRANADA	OGÍJARES	LAS GABIAS	GRANADA		6,90	26.383,70	
8	GRANADA	ALBOLOTE	CHURRIANA DE LA VEGA	LA ZUBIA	OGÍJARES	ALHAMA DE GRANADA	SALOBREÑA	GRANADA		7,88	25.502,30	
9	GRANADA	HUÉTOR VEGA	LA ZUBIA	LAS GABIAS	CHURRIANA DE LA VEGA	ALBOLOTE	GRANADA			4,67	25.229,10	
10	GRANADA	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	SANTA FE	LAS GABIAS	OGÍJARES	GRANADA			5,02	23.530,50	
11	GRANADA	ALBOLOTE	PELIGROS	PEDRO MARTÍNEZ	GUADIX	ÓRGIVA	VÉLEZ DE BENAUDALLA	SALOBREÑA	GRANADA	7,70	27.756,70	
12	GRANADA	PELIGROS	CHURRIANA DE LA VEGA	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	SANTA FE	ALHAMA DE GRANADA	OGÍJARES	GRANADA	7,52	25.496,90	
13	GRANADA	LA ZUBIA	LAS GABIAS	SANTA FE	LOJA	VALDERRUBIO	CHURRIANA DE LA VEGA	ALBOLOTE	GRANADA	7,37	31.839,80	
14	GRANADA	LA ZUBIA	PADUL	OGÍJARES	ALHAMA DE GRANADA	SANTA FE	VALDERRUBIO	CHURRIANA DE LA VEGA	PELIGROS	GRANADA	8,50	20.570,30
15	GRANADA	HUÉTOR VEGA	LA ZUBIA	CHURRIANA DE LA VEGA	VALDERRUBIO	ALBOLOTE	PELIGROS	GRANADA		5,67	24.864,00	
16	GRANADA	LA ZUBIA	CHURRIANA DE LA VEGA	VALDERRUBIO	ALBOLOTE	PELIGROS	GRANADA			4,95	23.129,80	
17	GRANADA	PELIGROS	PEDRO MARTÍNEZ	GUADIX	ÓRGIVA	VÉLEZ DE BENAUDALLA	MOTRIL	SALOBREÑA	GRANADA	9,22	25.960,10	
18	GRANADA	LA ZUBIA	LAS GABIAS	CHURRIANA DE LA VEGA	PELIGROS	GUADIX	GRANADA			5,50	22.115,30	
19	GRANADA	LA ZUBIA	OGÍJARES	LAS GABIAS	CHURRIANA DE LA VEGA	ALBOLOTE	GRANADA			4,55	26.066,80	
20	GRANADA	ALBOLOTE	PELIGROS	GUADIX	BAZA	CÚLLAR	HUÉSCAR	GRANADA		8,17	24.625,30	
21	GRANADA	LA ZUBIA	CHURRIANA DE LA VEGA	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	SANTA FE	LOJA	GRANADA		6,52	25.154,10	

(Fuente: elaboracion propia)

➤ Resolución por Búsqueda Local, ¿se pueden mejorar las rutas?:

Como ya explicamos en el problema anterior, se plantean rutas alternativas con puntos limpios vecinos. Esto se realiza ruta a ruta intentando encontrar alguna mejora en las funciones objetivo, el tiempo total de ruta y la carga total que transporta el vehículo, y por supuesto, sin olvidar el número de puntos limpios que visita, considerando mejor cuantos más puntos se visiten en la ruta.

Para realizar este proceso de una forma no tan tediosa, utilizamos nuestro algoritmo propio de nuevo, introduciendo en cada celda de la ruta, los puntos limpios que vayamos a intentar mejorar e iremos cambiando estos nodos por sus vecinos (con ayuda de nuestra matriz de vecindad de nodos) y así iremos comprobando de forma

directa como la función objetivo cambia, tanto para bien como para mal. Recordemos que en el anexo I se puede comprobar cómo funciona el algoritmo propio, y como al meter de forma manual un punto limpio en la lista de nodos, las funciones objetivo entre otros muchos resultados se calculan automáticamente.

Por tanto, tras este proceso de mejora de las rutas por búsqueda local, se obtiene:

MEJORA DE RUTAS INICIALES (GRANADA)

MEJORA DE PRIMERA SELECCIÓN DE RUTAS (ALGORITMO PROPIO CON ALEATORIEDAD Y VECINDAD)										TIEMPO TOTAL (HORAS)	CARGA TOTAL (LITROS)
		PUNTO LIMPIO MOVIDO			NUEVA INTRODUCCIÓN		RUTA DUPLICADA				
1	GRANADA	OGÍJARES	ALHAMA DE GRANADA	LOJA	SANTA FE	VALDERRUBIO	LAS GABIAS	CHURRIANA DE LA VEGA	GRANADA	7,73	21.558,21
2	GRANADA	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	SANTA FE	ALHAMA DE GRANADA	LAS GABIAS	CHURRIANA DE LA VEGA	GRANADA		6,62	24.914,59
3	GRANADA	LA ZUBIA	HUÉTOR VEGA	GUADIX	BAZA	PEDRO MARTÍNEZ	PELIGROS	GRANADA		7,43	19.117,93
4	GRANADA	PELIGROS	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	LOJA	SANTA FE	GRANADA			5,37	23.135,26
5	GRANADA	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	SANTA FE	ALHAMA DE GRANADA	LAS GABIAS	CHURRIANA DE LA VEGA	GRANADA		6,62	24.914,59
6	GRANADA	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	SANTA FE	ALHAMA DE GRANADA	LAS GABIAS	CHURRIANA DE LA VEGA	GRANADA		6,62	24.914,59
7	GRANADA	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	SANTA FE	LOJA	ALHAMA DE GRANADA	OGÍJARES	GRANADA		6,95	22.252,34
8	GRANADA	CHURRIANA DE LA VEGA	ALHAMA DE GRANADA	SALOBREÑA	DÚRCAL	PADUL	LA ZUBIA	GRANADA		7,57	14.926,15
9	GRANADA	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	SANTA FE	ALHAMA DE GRANADA	LAS GABIAS	CHURRIANA DE LA VEGA	GRANADA		6,62	24.914,59
10	GRANADA	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	SANTA FE	ALHAMA DE GRANADA	LAS GABIAS	CHURRIANA DE LA VEGA	GRANADA		6,62	24.914,59
11	GRANADA	PEDRO MARTÍNEZ	BAZA	CÚLLAR	HUÉSCAR	GUADIX	GRANADA			8,10	11.277,50
12	GRANADA	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	SANTA FE	ALHAMA DE GRANADA	LAS GABIAS	CHURRIANA DE LA VEGA	GRANADA		6,62	24.914,59
13	GRANADA	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	SANTA FE	ALHAMA DE GRANADA	LAS GABIAS	CHURRIANA DE LA VEGA	GRANADA		6,62	24.914,59
14	GRANADA	OGÍJARES	ALHAMA DE GRANADA	LOJA	SANTA FE	VALDERRUBIO	LAS GABIAS	CHURRIANA DE LA VEGA	GRANADA	7,73	21.558,21
15	GRANADA	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	SANTA FE	ALHAMA DE GRANADA	LAS GABIAS	CHURRIANA DE LA VEGA	GRANADA		6,62	24.914,59
16	GRANADA	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	SANTA FE	ALHAMA DE GRANADA	LAS GABIAS	CHURRIANA DE LA VEGA	GRANADA		6,62	24.914,59
17	GRANADA	PELIGROS	HUÉTOR VEGA	ÓRGIVA	VÉLEZ DE BENAUDALLA	MOTRIL	SALOBREÑA	DÚRCAL	GRANADA	7,63	23.155,92
18	GRANADA	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	SANTA FE	ALHAMA DE GRANADA	LAS GABIAS	CHURRIANA DE LA VEGA	GRANADA		6,62	24.914,59
19	GRANADA	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	SANTA FE	ALHAMA DE GRANADA	LAS GABIAS	CHURRIANA DE LA VEGA	GRANADA		6,62	24.914,59
20	GRANADA	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	SANTA FE	ALHAMA DE GRANADA	LAS GABIAS	CHURRIANA DE LA VEGA	GRANADA		6,62	24.914,59
21	GRANADA	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	SANTA FE	ALHAMA DE GRANADA	LAS GABIAS	CHURRIANA DE LA VEGA	GRANADA		6,62	24.914,59

(Fuente: elaboración propia)

Las rutas que se han presentado en la tabla anterior, son las rutas modificadas, respecto a las originales, en las que se han señalado tanto los puntos limpios que han cambiado de posición en la ruta como los que se han introducido como nuevos puntos. También se han remarcado, en verde, los valores que han cambiado en las columnas de tiempo y de carga de las rutas, y en rojo, los valores que superan los límites. Las rutas que han sido duplicadas por el proceso de mejora, aparecen sombreadas en gris.

Las rutas mejoradas se han representado en el mapa que aparece más abajo para comprobar visualmente como se distribuyen y elegir las más acertadas teniendo en cuenta, además de los valores de tiempo y carga, algunos factores, ya comentados anteriormente.

Seguidamente, se muestra la tabla de rutas tras eliminar las duplicadas. Marcadas en amarillo las que hemos elegido, en principio, como rutas finales y señaladas en rojo las que no son factibles por dejar algún punto limpio aislado o por alguna otra circunstancia.

Señalamos que la ruta 11, aparece con valores por encima de los límites de tiempo de ruta, pero tan solo lo hace en 6 minutos, por lo que sigue siendo válida.

HOJA DE SELECCIÓN DE RUTAS FINALES (GRANADA)

SELECCIÓN DE RUTAS FINALES (ALGORITMO PROPIO CON ALEATORIEDAD Y VECINDAD)										TIEMPO TOTAL (HORAS)	CARGA TOTAL (LITROS)
1	GRANADA	OCÍJARES	ALHAMA DE GRANADA	LOJA	SANTA FE	VALDERRUBIO	LAS GABIAS	CHURRIANA DE LA VEGA	GRANADA	7,73	21.558,21
2	GRANADA	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	SANTA FE	ALHAMA DE GRANADA	LAS GABIAS	CHURRIANA DE LA VEGA	GRANADA		6,62	24.914,59
3	GRANADA	LA ZUBIA	HUÉTOR VEGA	GUADIX	BAZA	PEDRO MARTÍNEZ	PELIGROS	GRANADA		7,43	19.117,93
4	GRANADA	PELIGROS	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	LOJA	SANTA FE	GRANADA			5,37	23.135,26
7	GRANADA	ALBOLOTE	VALDERRUBIO	SANTA FE	LOJA	ALHAMA DE GRANADA	OCÍJARES	GRANADA		6,95	22.252,34
8	GRANADA	CHURRIANA DE LA VEGA	ALHAMA DE GRANADA	SALOBREÑA	DÚRCAL	PADUL	LA ZUBIA	GRANADA		7,57	14.926,15
11	GRANADA	PEDRO MARTÍNEZ	BAZA	CÚLLAR	HUÉSCAR	GUADIX	GRANADA			8,10	11.277,50
17	GRANADA	PELIGROS	HUÉTOR VEGA	ÓRGIVA	VÉLEZ DE BENAUDALLA	MOTRIL	SALOBREÑA	DÚRCAL	GRANADA	7,63	23.155,92
NUEVA	GRANADA	LA ZUBIA	PADUL	ALBOLOTE	GRANADA					3,50	15.261,98

(Fuente: Elaboración propia)

Con las tres rutas finales elegidas hemos conseguido dar solución a prácticamente todos los puntos limpios de Granada, tan solo nos han faltado tres. Por lo que, se ha diseñado una nueva ruta con los nodos correspondientes, que aparece en la tabla en color azul.

De esta forma que queda resuelto el problema de enrutamiento de vehículos para la provincia de Granada con estas cuatro rutas finales.

Las rutas finales, solución del problema, se visualizan en el siguiente mapa de Granada.

MAPA RUTAS FINALES (GRANADA)



(Fuente: Elaboración propia)

La ruta que se visualiza en el mapa en color rojo, es la última ruta creada fuera del proceso, ya que son los puntos limpios que sobran del conjunto después de elegir las 3 rutas finales, y con la que se ha creado esta para completar el problema.

5.3. EL VRP PARA ALMERÍA.

La provincia costera de Almería cuenta con 103 municipios y en su totalidad dispone tan solo de 8 puntos limpios repartidos por la comarca. Al igual que en los procesos anteriores, se han realizado las estimaciones de aceite que se recicla. El aceite que se encuentra en los puntos limpios se ha obtenido agrupando las estimaciones de aceite de los municipios según la distancia entre estos y el punto limpio más cercano. Así, hemos conseguido cifras aproximadas del aceite que almacenan estos mensualmente. Estas cifras se presentan más abajo en la tabla correspondiente.

Podemos visualizar, en el siguiente mapa, los diferentes puntos limpios y sus localizaciones geográficas, aproximadas.

Mapa Almería, puntos limpios y almacén provincial.



(Fuente: Elaboración propia)

➤ **Datos para necesarios para la resolución del VRP en Almería:**

- Matriz de distancias entre puntos limpios, con 30 minutos incluidos para cargar el vehículo:

(Matriz de distancias entre puntos limpios, incluyendo tiempo de descarga de 0,5 h.)

DISTANCIAS (HORAS)		Albox	Almería	Arboleas	Carboneras	El Ejido	Huércal- Overa	Huercal de Almería	Vélez- Rubio
		1	2	3	4	5	6	7	8
Albox	1	0	1,83	0,80	1,50	2,10	0,93	1,70	1,30
Almería	2	1,83	0	1,80	1,27	0,92	1,65	0,70	2,08
Arboleas	3	0,80	1,80	0	2,48	2,08	0,92	1,68	1,35
Carboneras	4	1,50	1,27	2,48	0	1,67	1,42	1,22	1,85
El Ejido	5	2,10	0,92	2,08	1,67	0	1,93	1,95	2,37
Huércal- Overa	6	0,93	1,65	0,92	1,42	1,93	0	1,55	1,08
Huercal de Almería	7	1,70	0,70	1,68	1,22	1,95	1,55	0	1,95
Vélez-Rubio	8	1,30	2,08	1,35	1,85	2,37	1,08	1,95	0

(Fuente: Elaboración propia)

❖ Tabla de estimaciones de aceite usado, en litros mensuales, en los puntos limpios:

(Hoja estimación de aceite usado disponible en puntos limpios, en litros mensuales)

PUNTOS LIMPIOS	MUNICIPIOS	HABITANTES	LITROS RECICLADO/ MES	TOTAL LITROS RECICLADOS POR PUNTOS LIMPIOS/MES
1	Albox	Albánchez	754	80,7
		Albox	11.481	1.228,7
		Alcántar	577	61,8
		Alcudia de Montegud	148	15,8
		Armuña de Almanzora	327	35,0
		Bacares	244	26,1
		Bayarque	215	23,0
		Benitagla	66	7,1
		Benizalón	263	28,1
		Cantoria	3.251	347,9
		Castro de Filabres	130	13,9
		Chercos	291	31,1
		Cóbdar	156	16,7
		Fines	2.048	219,2
		Laroya	169	18,1
		Líjar	395	42,3
		Lúcar	771	82,5
		Macaol	5.576	596,7
		Olula del Río	6.216	665,2
		Oria	2.265	242,4
		Partalooa	975	104,3
		Purchena	1.636	175,1
		Senés	312	33,4
		Serón	2.080	222,6
		Sierro	400	42,8
		Somontín	471	50,4
		Sufil	222	23,8
		Tijola	3.615	386,9
		Urrácal	332	35,5
		Velefique	247	26,4
2	Almería	Almería	195.389	20.910,6
		Felix	661	70,7
		Roquetas de Mar	93.363	9.991,8
		Vicar	25.149	2.691,5
3	Arboleas	Antas	3.124	334,3
		Arboleas	4.463	477,6
		Bédar	892	95,5
		Turre	3.317	355,0
		Ulella del Campo	848	90,8
4	Carboneras	Zurgena	2.877	307,9
		Carboneras	7.837	838,7
		Los Gallardos	2.841	304,0
		Garrucha	8.666	927,4
		Lubrin	1.440	154,1
		Mojácar	6.330	677,4
		Sorbas	2.463	263,6
5	El Ejido	Tahal	346	37,0
		Adra	24.697	2.643,1
		Alcolea	811	86,8
		Balanegra	2.939	314,5
		Bayárcal	303	32,4
		Berja	12.331	1.319,7
		Dalias	3.986	426,6
		El Ejido	88.096	9.428,1
		Fiñana	2.014	215,5
		Fondón	1.002	107,2
		Laujar de Andarax	1.533	164,1
		La Mojonera	8.717	932,9
		Paterna del Río	364	39,0
6	Huércal-Overa	Huércal-Overa	18.649	1.995,8
		Pulpí	9.055	969,1
		Taberno	984	105,3
		Vera	15.528	1.661,8
	Huércal de Almería	Abla	1.267	135,6
		Abrucena	1.170	125,2
		Alboloduy	610	65,3
		Alhabia	678	72,6
		Alhama de Almería	3.653	390,9
		Alicún	217	23,2
		Almócita	174	18,6
		Alsodux	132	14,1
		Beires	110	11,8
		Benahadux	4.212	450,8
		Bentarique	238	25,5
		Canjáyar	1.223	130,9
		Cuevas del Almanzora	13.655	1.461,4
		Enix	434	46,4
		Gádor	3.037	325,0
		Gérgal	1.030	110,2
		Huécija	501	53,6
		Huércal de Almería	17.234	1.844,4
		Íllar	374	40,0
		Instinción	430	46,0
		Lucainena de las Torres	570	61,0
		Nacimiento	475	50,8
		Níjar	28.996	3.103,2
		Ohanes	626	67,0
		Olula de Castro	191	20,4
		Padules	436	46,7
7	Huércal de Almería	Pechina	4.010	429,2
		Rágol	307	32,9
		Rioja	1.367	146,3
		Santa Cruz de Marchena	225	24,1
		Santa Fe de Mondújar	429	45,9
		Tabernas	3.679	393,7
		Terque	386	41,3
		Las Tres Villas	598	64,0
		Turrillas	229	24,5
		Viator	5.686	608,5
		Chirivel	1.568	167,8
		María	1.288	137,8
		Vélez-Blanco	1.918	205,3
		Vélez-Rubio	6.661	712,9
8	Vélez-Rubio			

(Fuente: Elaboración propia)

- ❖ Matriz para el algoritmo propio de puntos limpios y sus vecinos o puntos colindantes:

(Matriz puntos limpios vecinos)

Albox	Almería	Arboleas	Carboneras	El Ejido	Huércal-Overa	Huércal de Almería	Vélez-Rubio
Arboleas	El Ejido	Albox	Huércal-Overa	Almería	Vélez-Rubio	El Ejido	Huércal-Overa
Vélez-Rubio	Huércal de Almería	Huércal-Overa	Arboleas	Huércal de Almería	Arboleas	Almería	Albox
Huércal de Almería	Carboneras	Carboneras	Huércal de Almería		Carboneras	Carboneras	
			Almería			Albox	

(Fuente: Elaboración propia)

➤ Resolución del problema VRP para Almería:

- Rutas aleatorias obtenidas por el algoritmo propio:

Para el problema de enrutamiento de vehículos en Almería se cuenta con tan solo ocho puntos limpios, no obstante, como se aprecia en el mapa anterior de la zona, estos se distribuyen ampliamente por toda la comarca. Por tanto, no resulta tan sencilla su resolución como aparentemente parece.

Se han obtenido, por medio del algoritmo creado, 1500 rutas aleatorias con restricción de vecindad, se han elegido diecisiete de estas como las mejores y se muestran a continuación.

Se puede observar como, por un lado, las rutas creadas contienen casi los mismos puntos limpios, cosa que no es de extrañar por el número de nodos del problema, y por otro lado se aprecia como algunas no son viables, marcadas en rojo, ya que sus funciones objetivo sobrepasan los límites, no obstante, las hemos conservado puesto que al igual que en los VRP anteriores, no sobrepasan demasiado estos valores.

Como la mayoría de las rutas contienen casi todos los puntos, no hay mucha discusión a la hora de buscar mejoras en el paso siguiente.

(Lista mejores rutas obtenidas por algoritmo propio para Almería.)

SELECCIÓN DE RUTAS FINALES (ALGORITMO PROPIO CON ALEATORIEDAD Y VECINDAD)								TIEMPO TOTAL (HORAS)	CARGA TOTAL (LITROS)
1	ALMERÍA	CARBONERAS	HUÉRCAL- OVERA	VÉLEZ-RUBIO	ALBOX	HUÉRCAL DE ALMERÍA	ALMERÍA	7,47	24.592,9
2	ALMERÍA	HUÉRCAL DE ALMERÍA	ALBOX	VÉLEZ-RUBIO	HUÉRCAL- OVERA	ARBOLEAS	ALMERÍA	7,50	23.051,6
3	ALMERÍA	CARBONERAS	HUÉRCAL DE ALMERÍA	ALBOX	ARBOLEAS	HUÉRCAL- OVERA	ALMERÍA	7,55	25.030,2
4	ALMERÍA	CARBONERAS	HUÉRCAL- OVERA	VÉLEZ-RUBIO	ALBOX	HUÉRCAL DE ALMERÍA	ALMERÍA	7,47	24.592,9
5	ALMERÍA	CARBONERAS	ARBOLEAS	ALBOX	HUÉRCAL DE ALMERÍA	ALMERÍA		6,95	20.298,2
6	ALMERÍA	CARBONERAS	HUÉRCAL DE ALMERÍA	EL EJIDO	ALMERÍA			5,35	29.463,3
7	ALMERÍA	CARBONERAS	HUÉRCAL DE ALMERÍA	ALBOX	ARBOLEAS	HUÉRCAL- OVERA	ALMERÍA	7,55	25.030,2
8	ALMERÍA	HUÉRCAL DE ALMERÍA	ALBOX	ARBOLEAS	CARBONERAS	ALMERÍA		6,95	20.298,2
9	ALMERÍA	HUÉRCAL DE ALMERÍA	ALBOX	VÉLEZ-RUBIO	HUÉRCAL- OVERA	ARBOLEAS	ALMERÍA	7,50	23.051,6
10	ALMERÍA	HUÉRCAL DE ALMERÍA	ALBOX	ARBOLEAS	HUÉRCAL- OVERA	CARBONERAS	ALMERÍA	6,80	25.030,2
11	ALMERÍA	CARBONERAS	HUÉRCAL DE ALMERÍA	ALBOX	VÉLEZ-RUBIO	HUÉRCAL- OVERA	ALMERÍA	8,22	24.592,9
12	ALMERÍA	CARBONERAS	HUÉRCAL DE ALMERÍA	EL EJIDO	ALMERÍA			5,35	29.463,3
13	ALMERÍA	HUÉRCAL DE ALMERÍA	ALBOX	VÉLEZ-RUBIO	HUÉRCAL- OVERA	ARBOLEAS	ALMERÍA	7,50	23.051,6
14	ALMERÍA	CARBONERAS	HUÉRCAL- OVERA	ARBOLEAS	ALBOX	HUÉRCAL DE ALMERÍA	ALMERÍA	6,80	25.030,2
15	ALMERÍA	CARBONERAS	HUÉRCAL- OVERA	VÉLEZ-RUBIO	ALBOX	HUÉRCAL DE ALMERÍA	ALMERÍA	7,47	24.592,9
16	ALMERÍA	CARBONERAS	HUÉRCAL DE ALMERÍA	ALBOX	VÉLEZ-RUBIO	HUÉRCAL- OVERA	ALMERÍA	8,22	24.592,9
17	ALMERÍA	CARBONERAS	HUÉRCAL- OVERA	VÉLEZ-RUBIO	ALBOX	HUÉRCAL DE ALMERÍA	ALMERÍA	7,47	24.592,9

(Fuente: Elaboración propia)

Dejando las rutas más recomendables y eliminando las duplicadas, tenemos:

(Lista mejores rutas obtenidas por algoritmo propio, despues de eliminar peores y duplicadas, para Almería.)

SELECCIÓN DE RUTAS FINALES (ALGORITMO PROPIO CON ALEATORIEDAD Y VECINDAD)								TIEMPO TOTAL (HORAS)	CARGA TOTAL (LITROS)
1	ALMERÍA	CARBONERAS	HUÉRCAL- OVERA	VÉLEZ-RUBIO	ALBOX	HUÉRCAL DE ALMERÍA	ALMERÍA	7,47	24.592,9
2	ALMERÍA	HUÉRCAL DE ALMERÍA	ALBOX	VÉLEZ-RUBIO	HUÉRCAL- OVERA	ARBOLEAS	ALMERÍA	7,50	23.051,6
3	ALMERÍA	CARBONERAS	HUÉRCAL DE ALMERÍA	ALBOX	ARBOLEAS	HUÉRCAL- OVERA	ALMERÍA	7,55	25.030,2
5	ALMERÍA	CARBONERAS	ARBOLEAS	ALBOX	HUÉRCAL DE ALMERÍA	ALMERÍA		6,95	20.298,2
6	ALMERÍA	CARBONERAS	HUÉRCAL DE ALMERÍA	EL EJIDO	ALMERÍA			5,35	29.463,3
10	ALMERÍA	HUÉRCAL DE ALMERÍA	ALBOX	ARBOLEAS	HUÉRCAL- OVERA	CARBONERAS	ALMERÍA	6,80	25.030,2

(Fuente: Elaboración propia)

Que han sido las rutas seleccionadas como rutas iniciales, y una vez realizado el proceso de mejora con “Búsqueda Local”, obtenemos la siguiente tabla con las rutas finales y la solución al problema.

(TABLA CON RUTAS MEJORADAS POR BUSQUEDA LOCAL PARA ALMERÍA)

RUTAS MEJORADAS POR BUSQUEDA LOCAL, ALMERÍA								TIEMPO TOTAL (HORAS)	CARGA TOTAL (LITROS)
1	ALMERÍA	CARBONERAS	HUÉRCAL- OVERA	VÉLEZ-RUBIO	ALBOX	ARBOLEAS	ALMERÍA	7,67	15.702,9
2	ALMERÍA	CARBONERAS	HUÉRCAL- OVERA	VÉLEZ-RUBIO	ALBOX	ARBOLEAS	ALMERÍA	7,67	15.702,9
3	ALMERÍA	CARBONERAS	HUÉRCAL- OVERA	VÉLEZ-RUBIO	ALBOX	ARBOLEAS	ALMERÍA	7,67	15.702,9
5	ALMERÍA	CARBONERAS	HUÉRCAL- OVERA	VÉLEZ-RUBIO	ALBOX	ARBOLEAS	ALMERÍA	7,67	15.702,9
6	ALMERÍA	CARBONERAS	HUÉRCAL- OVERA	ARBOLEAS	HUÉRCAL DE ALMERÍA	ALMERÍA		5,98	20.146,5
10	ALMERÍA	CARBONERAS	HUÉRCAL- OVERA	VÉLEZ-RUBIO	ALBOX	ARBOLEAS	ALMERÍA	7,67	15.702,9

(Fuente: Elaboración propia)

Las rutas marcadas en rojo, son rutas duplicadas tras el proceso de mejora y por consiguiente solo tenemos dos rutas válidas. En color anaranjado se marcan los puntos limpios que han sido introducidos en la ruta y encuadrados los que han sido modificados de orden, es decir, han sido movidos de posición.

Como el caso de Almería no cuenta con demasiados nodos, nos damos cuenta que al elegir como ruta final cualesquiera de las dos rutas que hemos obtenido, aunque claramente la primera es mejor, se nos queda solo un par de puntos limpios para formar la siguiente ruta.

En la siguiente tabla se presentan las rutas finales que quedarían:

(TABLA CON RUTAS FINALES POR BUSQUEDA LOCAL PARA ALMERÍA)

RUTAS FINALES POR BUSQUEDA LOCAL, ALMERÍA								TIEMPO TOTAL (HORAS)	CARGA TOTAL (LITROS)
1	ALMERÍA	CARBONERAS	HUÉRCAL- OVERA	VÉLEZ-RUBIO	ALBOX	ARBOLEAS	ALMERÍA	7,67	15.702,9
2	ALMERÍA	HUÉRCAL DE ALMERÍA	EL EJIDO	ALMERÍA				3,57	26.260,9

(Fuente: Elaboración propia)

Si visualizamos el mapa de la comarca, que anteriormente presentamos y que más adelante encontramos con las rutas finales del problema, podemos observar que El Ejido parece estar un poco separado del conjunto de nodos, es por esto por lo que una ruta completa, con todos los puntos limpios del problema, no es posible. Además, hay que tener presente la cantidad de aceite con la que cuenta este punto limpio, más de quince mil litros. Este junto con Huércal de Almería son dos nodos con niveles de aceite elevados.

Casualmente nos hemos encontrado con que la segunda ruta de nuestro problema presenta a estos dos puntos limpios en la misma ruta por lo que se hace imposible completar el problema de VRP con esta solución. Puesto que no existe solución alguna con una ruta

con estos dos nodos, la única posibilidad es buscar rutas, al menos dos, que tengan estos puntos en rutas diferentes.

Por lo que hemos repetido el proceso de creación de rutas, teniendo en cuenta la restricción anterior; hemos realizado mejoras con búsqueda local, buscando cambios entre vecinos intentando obtener mejores resultados tanto de carga (que no supere el límite de 25.000 litros) como de tiempo de ruta; y hemos escogido las mejores rutas.

Este proceso nos ha dado finalmente las rutas finales que se presentan seguidamente, dando solución al problema del VRP de Almería.

(TABLA CON RUTAS FINALES PARA ALMERÍA)

RUTAS FINALES, ALMERÍA							TIEMPO TOTAL (HORAS)	CARGA TOTAL (LITROS)
1	ALMERÍA	CARBONERAS	HUÉRCAL- OVERA	ARBOLEAS	HUÉRCAL DE ALMERÍA	ALMERÍA	5,98	20.146,5
2	ALMERÍA	EL EJIDO	ALBOX	VÉLEZ-RUBIO	ALMERÍA		6,40	21.817,3

(Fuente: Elaboración propia)

Visualmente lo vemos en el siguiente mapa del territorio:

(MAPA RUTAS FINALES, ALMERÍA)



(Fuente: Elaboración propia)

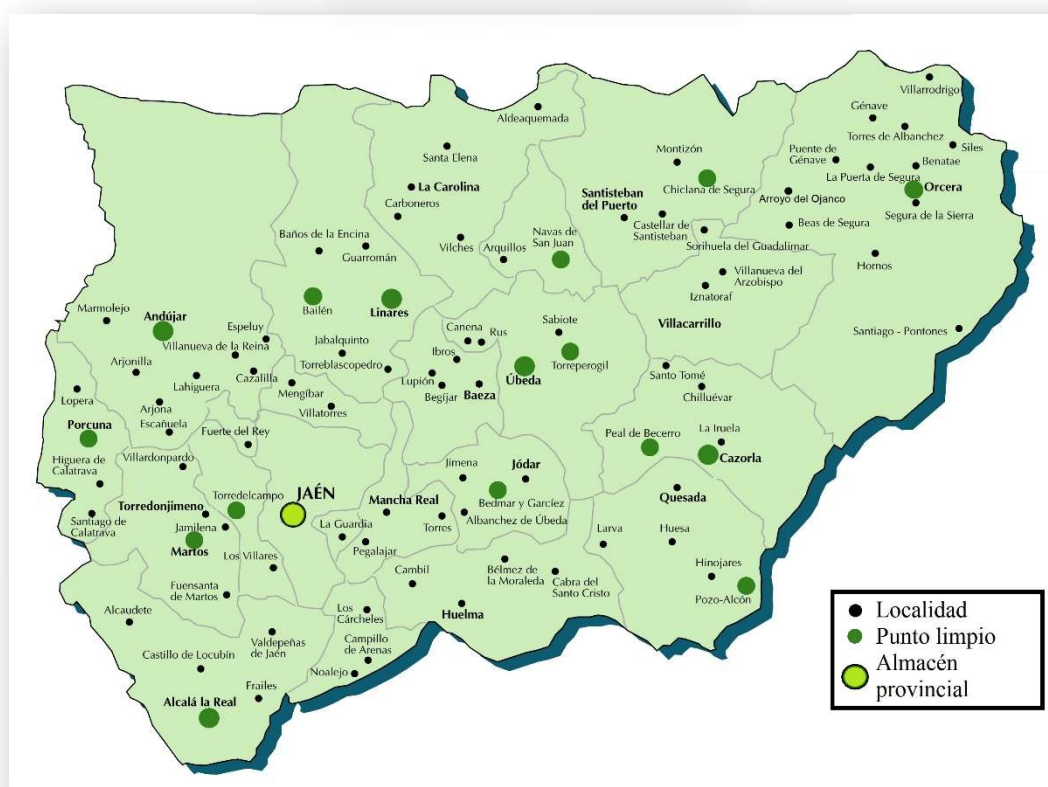
5.4. EL VRP PARA JAÉN.

Esta provincia cuenta con un total de 96 municipios y 16 de ellos cuentan con punto limpio, repartiendo así, este servicio por toda la comarca.

Después de realizar las estimaciones de las cantidades de aceite que se reciclan en cada localidad, así como de las cantidades que recibe cada punto limpio, al igual que hemos realizado para las provincias anteriores, se ha llegado a las cifras que se muestran más adelante en la matriz de aceite reciclado en litros mensuales.

A continuación, se muestra un mapa con las localizaciones geográficas, aproximadas, de los puntos limpios de la provincia y el almacén principal, que, en este caso, coincide con el almacén central, donde se almacena todo el producto recogido de la zona Este de Andalucía.

Mapa Jaén puntos limpios y almacen provincial



(Fuente: Elaboración propia)

Los datos necesarios para la resolución del VRP se muestran seguidamente, siendo estos, la matriz de distancias entre los puntos limpios, en horas; la tabla con las estimaciones de aceite usado que encuentra en los puntos limpios mensualmente y la tabla con los diferentes puntos limpios de la zona y sus colindantes o vecinos.

➤ Datos para el VRP en Jaén:

- Matriz de distancias entre puntos limpios, con tiempo de carga, estimado, incluido:

(Matriz de distancias entre puntos limpios, incluyendo tiempo de descarga (0,5 h.))

DISTANCIAS HORAS	JAÉN	ALCALA	ANDUJAR	BAILÉN	BEDMAR	CAZORLA	CHICLANA	LINARES	MARTOS	NAVAS	ORCERA	PEAL	PORCUNA	POZO	TORREDELCAMPO	TORREPEROGIL	ÚBEDA
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
JAÉN	0	1,43	1,07	0,93	1,13	1,63	2,00	1,02	0,87	1,42	2,35	1,45	1,35	2,07	0,73	1,20	1,15
ALCALA	1	0	2,53	1,72	1,88	2,49	2,80	1,87	1,17	2,25	3,10	2,28	1,50	2,30	1,30	1,98	1,93
ANDUJAR	2	1,07	0	0,95	1,67	1,85	2,07	1,10	1,28	1,50	2,48	1,67	0,98	2,32	1,20	1,40	1,38
BAILÉN	3	0,93	1,72	0	1,37	1,53	1,75	0,78	1,20	1,18	2,17	1,37	1,23	2,00	1,08	1,08	1,08
BEDMAR	4	1,13	1,88	1,67	0	1,35	1,95	1,40	1,43	1,37	2,23	1,17	1,67	1,57	1,32	1,10	0,98
CAZORLA	5	1,63	2,43	1,85	1,53	0	1,82	1,50	1,93	1,47	2,00	0,77	2,17	1,53	1,82	1,03	1,22
CHICLANA	6	2,00	2,80	2,07	1,75	1,95	1,82	0	1,63	2,28	1,13	1,30	1,82	2,37	2,62	2,18	1,52
LINARES	7	1,02	1,87	1,10	0,78	1,40	1,50	1,63	0	1,33	1,07	2,05	1,33	1,42	1,98	1,22	1,07
MARTOS	8	0,87	1,17	1,28	1,20	1,43	1,93	2,28	1,33	0	1,78	2,65	1,78	1,03	2,40	0,73	1,50
NAVAS	9	1,42	2,25	1,50	1,18	1,17	1,47	1,13	1,07	1,78	0	1,55	1,30	1,80	2,03	1,60	1,03
ORCERA	10	2,35	3,10	2,48	2,17	2,23	2,00	2,05	2,65	1,55	0	2,00	2,82	2,80	2,45	1,68	1,85
PEAL	11	1,45	2,28	1,67	1,37	1,17	0,77	1,82	1,33	1,78	1,30	2,00	0	1,98	1,35	1,80	0,88
PORCUNA	12	1,35	1,50	0,98	1,23	1,67	2,17	2,37	1,42	1,03	1,80	2,82	1,98	0	2,68	0,95	1,70
POZO	13	2,07	2,30	2,32	2,00	1,57	1,53	2,62	1,98	2,40	2,03	2,80	1,35	2,68	0	2,23	1,63
TORREDELCAMPO	14	0,73	1,30	1,20	1,08	1,32	1,82	2,18	1,22	0,73	1,60	2,45	1,80	0,95	2,23	0	1,37
TORREPEROGIL	15	1,20	1,98	1,40	1,08	1,10	1,03	1,52	1,07	1,50	1,03	1,68	0,88	1,70	1,63	1,37	0
ÚBEDA	16	1,15	1,93	1,38	1,08	0,98	1,22	1,57	1,05	1,45	1,02	1,85	1,05	1,65	1,60	1,32	0,77

(Fuente: elaboración propia)

- Tabla con estimación de litros de aceite usado disponible mensualmente, en los puntos limpios:

(Matriz de litros de aceite usado disponible, mensualmente, en los puntos limpios)

PUNTO LIMPIO	MUNICIPIOS	HABITANTES	RECICLAJE LITROS/MES	RECICLAJE TOTAL PUNTO LIMPIO (LITROS)
1	ALCALA LA REAL	Alcala la Real Castiello de Locubín Frailes	21758 4212 1637	2328,6 450,8 175,2
2	ANDUJAR	Andujar Marmolejo Arjonilla Villanueva de la Arjona Esañuela La higuera	37975 7053 3695 3152 5691 947 1771	4064,1 754,8 395,4 337,3 609,1 101,3 189,5
3	BAILÉN	Bailén Baños de la Encina Jabalquinto Espeluy	18085 2634 2152 687	1935,5 281,9 230,3 73,5
4	BEDMAR-GARCÍA	Bedmar-García Jodar Jimena Torres Albánchez de Bémez de la Cabra del Santo Huelma	2823 11994 1323 1513 1072 1646 1908 6021	302,1 1283,6 141,6 161,9 114,7 176,2 204,2 644,4
5	CAZORLA	Cazorla Chilluevar La Iruela	7673 1499 1989	821,2 160,4 212,9
6	CHICLANA DE SEGURA	Chiclana de Segura Montizón Santisteban del Castellar de Soriñuela del Arroyo del Ojanco Beas de Segura	1002 1768 4621 3411 1196 2354 5280	107,2 189,2 494,5 365,0 128,0 251,9 575,9
7	JAÉN	Jaén Cañalilla Mengibar Villatorres Torreblascopedro Fuerte del Rey Mancha real La guardia Pegalajar Cambil Los Villares Los Cárcheles Valdepeñas de Campillo de Noalejo	114658 846 9921 4377 2669 1399 11194 4895 2966 2802 6019 1387 3910 1897 1977	12270,8 90,5 1061,8 468,4 285,6 149,7 1198,0 523,9 317,4 299,9 644,2 148,4 418,5 203,0 211,6

(Fuente: elaboración propia)

PUNTO LIMPIO	MUNICIPIOS	HABITANTES	RECICLAJE LITROS/MES	RECICLAJE TOTAL PUNTO LIMPIO (LITROS)
7	LINARES	Linares Santa Elena La Carolina Carboneros Vilches Guarromán	58029 966 15579 630 4646 2861	6298,9 103,4 1667,3 67,4 497,2 306,2
8	MARTOS	Martos Santiago de Torredonjimeno Jamilena Fuensanta de Alcudete	24240 727 13874 3376 3115 10698	2594,2 77,8 1484,8 361,3 333,4 1144,9
9	NAVAS DE SAN JUAN	Navas de San Juan Aldequemada Arquillos	4597 516 1836	492,0 55,2 196,5
10	ORCERA	Orcera Villarrodrigo Génave Torres de Siles Puente Génave La Puerta de Benatae Segura de la Sierra Hornos Santiago -	1894 441 608 860 2336 2216 2435 463 1845 649 3229	202,7 47,2 65,1 92,0 250,0 237,2 260,6 49,6 197,5 69,5 345,6
11	PEAL DE BECERRO	Peal de Becerro Quesada Iarva Huesa	5325 5483 483 2553	569,9 586,8 54,7 273,2
12	PORCUNA	Porcuna Lopera Higuera de	6532 3743 632	699,1 400,6 67,6
13	POZO ALCÓN	Pozo-Alcón Hinojares	4857 338	519,8 36,2
14	TORREDELCAMPO	Torredelcampo Villardondardo	14538 1017	1555,9 108,8
15	TORREPEROGIL	Torreperogil Villanueva del Villacarrillo Sabiote Villacarrillo Iznatoraf	7468 8447 4042 11000 1031	799,2 904,0 432,6 1177,2 110,3
16	ÚBEDA	Úbeda Canena Rus Ibros Baeta Lupión Begíjar	34835 1943 3668 2956 16100 883 3102	3728,1 207,9 392,6 316,4 1723,0 94,5 332,0

- Matriz de puntos limpios vecinos:

Matriz puntos limpios vecinos																	
VECINOS	ALCALA JAÉN	ANDUJAR JAÉN BAILÉN	BAILÉN JAÉN LINARES	BEDMAR JAÉN ÚBEDA PEAL POZO	Cazorla PEAL T.GIL	Chiclana T.GIL NAVAS	JAÉN MARTOS T.CAMPO ANDUJAR BAILÉN LINARES ÚBEDA BEDMAR	LINARES JAÉN ÚBEDA NAVAS	MARTOS PORCUNA ALCALA T.CAMPO	NAVAS Chiclana T.GIL LINARES	ORCERA Chiclana T.GIL	PEAL BEDMAR POZO Cazorla T.GIL	PORCUNA MARTOS T.CAMPO ANDUJAR	POZO PEAL Cazorla BEDMAR	TORREDEL CAMPO JAÉN MARTOS PORCUNA ANDUJAR	TORREPER OGIL ORCERA Chiclana NAVAS ÚBEDA PEAL Cazorla	ÚBEDA T.GIL LINARES JAÉN BEDMAR

(Fuente: Elaboración propia)

➤ Resolución del VRP en Jaén:

- Creación de rutas aleatorias a partir del algoritmo propio:

Para este problema de enrutamiento de vehículos se han realizado, con nuestro algoritmo, 5 repeticiones de 1500 rutas cada una, para crear caminos aleatorios en base a vecindad. De estas se han escogido las 10 mejores rutas, que aparecen en la siguiente tabla, atendiendo a los valores de las variables de las restricciones siguientes: el tiempo de ruta, comprendido entre 6,5 y 8 horas, la carga máxima del vehículo, que no puede superar los 25.000 litros y el número de puntos visitados, siendo mejor cuantos más se visiten por ruta.

Las rutas aleatorias obtenidas son:

(Lista mejores rutas elegidas tras proceso de aleatoriedad con vecindad)

Rutas																Tiempo total (horas)	Carga total (litros)
1	JAÉN	T.CAMPO	ANDUJAR	PORCUNA	MARTOS	ALCALA	JAÉN	!	!	!	!	!	!	!	!	6,55	18234,5
2	JAÉN	BAILÉN	LINARES	NAVAS	T.GIL	Cazorla	PEAL	BEDMAR	JAÉN	!	!	!	!	!	!	7,92	21330,4
3	JAÉN	BAILÉN	ANDUJAR	PORCUNA	MARTOS	ALCALA	JAÉN	!	!	!	!	!	!	!	!	6,50	19091,0
4	JAÉN	BAILÉN	ANDUJAR	PORCUNA	T.CAMPO	MARTOS	ALCALA	JAÉN	!	!	!	!	!	!	!	7,15	20755,7
5	JAÉN	T.CAMPO	ANDUJAR	PORCUNA	MARTOS	ALCALA	JAÉN	!	!	!	!	!	!	!	!	6,55	18234,5
6	JAÉN	LINARES	NAVAS	Chiclana	T.GIL	ÚBEDA	JAÉN	!	!	!	!	!	!	!	!	6,65	22010,6
7	JAÉN	BAILÉN	ANDUJAR	PORCUNA	MARTOS	ALCALA	JAÉN	!	!	!	!	!	!	!	!	6,50	19091,0
8	JAÉN	BAILÉN	ANDUJAR	PORCUNA	T.CAMPO	MARTOS	ALCALA	JAÉN	!	!	!	!	!	!	!	7,15	20755,7
9	JAÉN	BEDMAR	PEAL	Cazorla	T.GIL	NAVAS	LINARES	JAÉN	!	!	!	!	!	!	!	7,22	18809,2
10	JAÉN	BAILÉN	ANDUJAR	PORCUNA	MARTOS	ALCALA	JAÉN	!	!	!	!	!	!	!	!	6,50	19091,0

(Fuente: Elaboración propia)

- Mejora de las rutas por Búsqueda Local:

Tal cual se ha realizado en los VRP anteriores, en esta parte, una vez hemos obtenido las rutas aleatorias, se trata de mejorar estas por medio de búsqueda de rutas vecinas, planteando rutas alternativas.

Tras plantear rutas diferentes, vecinas a cada una de las originales, hemos obtenido las mejores:

(Hoja de rutas modificadas por "Búsqueda local")

Rutas																	Tiempo total (horas)	Carga total (litros)
1	JAÉN	BAILÉN	ANDUJAR	PORCUNA	MARTOS	ALCALA	T.CAMPO	JAÉN	!	!	!	!	!	!	!	!	7,10	20.755,7
2	JAÉN	BAILÉN	LINARES	NAVAS	T.GIL	Cazorla	PEAL	BEDMAR	JAÉN	!	!	!	!	!	!	!	7,92	21.330,4
3	JAÉN	BAILÉN	ANDUJAR	PORCUNA	MARTOS	ALCALA	T.CAMPO	JAÉN	!	!	!	!	!	!	!	!	7,10	20.755,7
4	JAÉN	BAILÉN	ANDUJAR	PORCUNA	T.CAMPO	MARTOS	ALCALA	JAÉN	!	!	!	!	!	!	!	!	7,15	20.755,7
5	JAÉN	T.CAMPO	ANDUJAR	PORCUNA	MARTOS	ALCALA	JAÉN	!	!	!	!	!	!	!	!	!	6,55	18.234,5
6	JAÉN	BAILÉN	LINARES	NAVAS	Chiclana	T.GIL	ÚBEDA	JAÉN	!	!	!	!	!	!	!	!	7,35	24.531,8
7	JAÉN	BAILÉN	ANDUJAR	PORCUNA	MARTOS	ALCALA	T.CAMPO	JAÉN	!	!	!	!	!	!	!	!	7,10	20.755,7
8	JAÉN	BAILÉN	ANDUJAR	PORCUNA	MARTOS	ALCALA	T.CAMPO	JAÉN	!	!	!	!	!	!	!	!	7,10	20.755,7
9	JAÉN	BEDMAR	POZO	Cazorla	PEAL	T.GIL	ÚBEDA	JAÉN	!	!	!	!	!	!	!	!	7,80	16.478,5
10	JAÉN	BAILÉN	ANDUJAR	PORCUNA	MARTOS	ALCALA	T.CAMPO	JAÉN	!	!	!	!	!	!	!	!	7,10	20.755,7

(Fuente: Elaboración propia)

La tabla anterior, corresponde a las rutas originales aleatorias modificadas. En esta se han señalado los cambios producidos en las rutas, se han encuadrado los puntos limpios que han sido modificados de orden y se han sombreado en color rojizo las rutas que por el proceso de mejora han acabado siendo iguales a alguna otra ruta y por lo que al estar duplicadas serán eliminadas más adelante.

Una vez hecho este proceso de mejora, hemos elegido la mejor para ser ruta final, sombreada en color amarillo en la lista anterior. El proceso continúa realizando los mismos cálculos desde el principio (eliminando los puntos ya enrutados), creando rutas aleatorias, mejorando con Búsqueda Local y eligiendo la ruta/s finales.

La ruta final ha sido elegida en función de proximidad a las 8 horas conducción del vehículo, a la carga que no se encuentra excesivamente cercana al límite de 25.000 litros, y por supuesto y más importante, a la cantidad de puntos limpios que se visitan.

(Hoja primera ruta final)

PRIMERA RUTA FINAL																	Tiempo total (horas)	Carga total (litros)
1ª RUTA	JAÉN	BAILÉN	LINARES	NAVAS	TORREPEROGIL	CAZORLA	PEAL	BEDMAR	JAÉN	!	!	!	!	!	!	!	7,92	21.330,4

(Fuente: Elaboración propia)

Para la obtención de las siguientes rutas finales hemos resumido el proceso para no acabar con un trabajo demasiado tedioso y repetitivo, tal cual se comentó al principio de este apartado de Resultados, ya que la mecánica es idéntica. De tal forma, se exponen los resultados que hemos obtenido de una forma más expositiva.

Eliminando los puntos ya enrutados, obtenemos la segunda y tercera ruta final, consiguiendo así la resolución completa al VRP de Jaén:

(Hoja con segunda y tercera ruta final)

SEGUNDA RUTA FINAL															Tiempo total (horas)	Carga total (litros)
2ª RUTA	JAÉN	TORREDELCAMPO	MARTOS	ALCALA	POZO	ÚBEDA	JAÉN	!	!	!	!	!	!	!	7,68	17.966,0

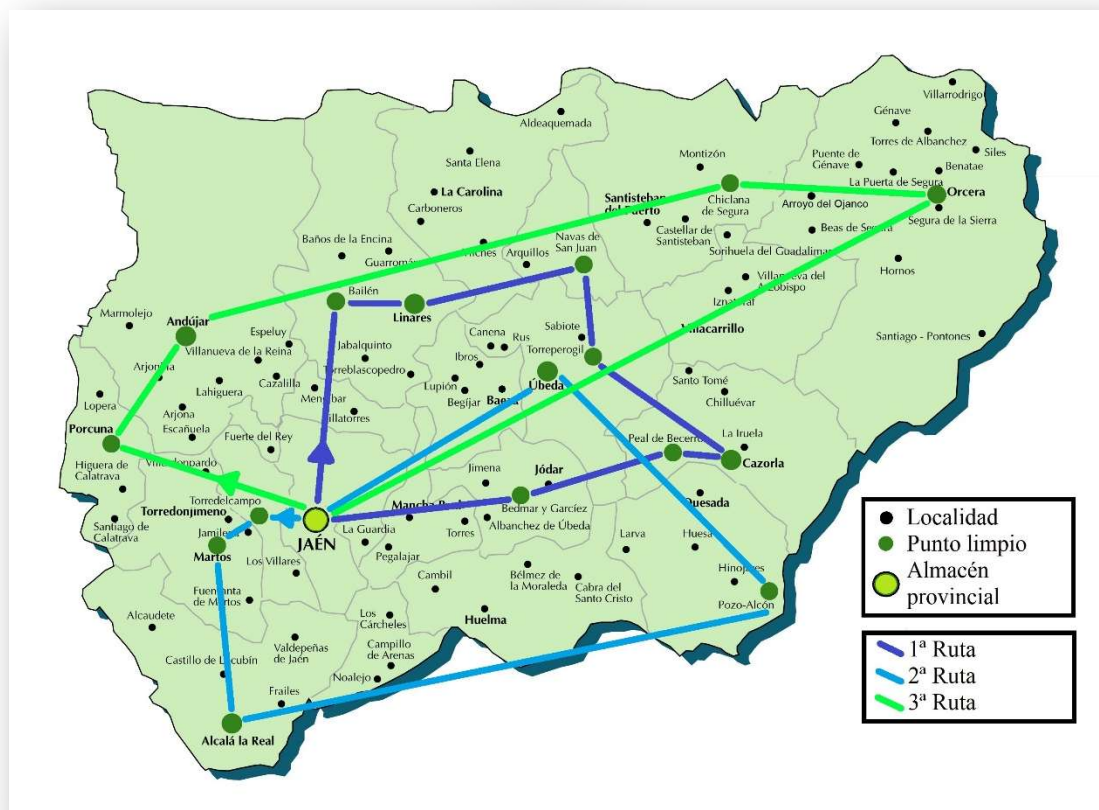
TERCERA RUTA FINAL															Tiempo total (horas)	Carga total (litros)
3ª RUTA	JAÉN	PORCUNA	ANDUJAR	CHICLANA	ORCERA	JAÉN	!	!	!	!	!	!	!	!	8,05	11.547,4

(Fuente: Elaboración propia)

Respecto a la última ruta, podemos ver que el tiempo total de conducción sobrepasa en 3 minutos las 8 horas estipuladas. No obstante, el tiempo real de conducción es de 9 horas para camiones, con 45 minutos de descanso, por lo que la ruta sigue siendo válida aun con este pequeño desajuste. Además, la ruta cuenta con cargas leves de aceite en los diferentes puntos limpios, por lo que se ahorraría en los tiempos estimados para ello (treinta minutos por punto) por lo que este tiempo total de ruta, debería de verse reducido.

Por consiguiente, queda resuelto el problema y podemos visualizar estos resultados en el siguiente mapa de rutas para la provincia de Jaén.

Mapa rutas Jaén



(Fuente: Elaboración propia)

6. CONCLUSIONES.

El problema de enrutamiento de vehículos para el Este de Andalucía queda solucionado con la resolución de sus cuatro provincias, Córdoba, Granada, Almería y Jaén.

Dando lugar, en principio, a una flota total de 15 camiones cisterna de 25.000 litros de capacidad que se recorren las 15 rutas óptimas que se han diseñado. Se distribuyen, respectivamente para cada provincia, en 6, 4, 2 y 3 caminos, realizando viajes cercanos a 8 horas y permitiendo a los conductores realizar la jornada completa sin sobrepasar el tiempo permitido de conducción.

Por tanto, el aceite usado disponible en los puntos limpios se transporta completamente hasta los almacenes provinciales por estas rutas. Existiendo una ruta final que se encarga de transportar desde estos almacenes hasta el depósito central situado en Jaén, donde se deposita hasta su transporte a Madrid.

No obstante, para mejorar la productividad de la empresa, lo más aconsejable sería disponer tan solo de un solo vehículo. Al tratarse de cantidades mensuales, las disponibles en los diferentes puntos limpios, los vehículos pueden recorrer cada día una ruta diferente, completando las 4 provincias en un mes.

El aceite cordobés se transportaría en 6 días, se utilizaría otro día para llevar el camión hasta la próxima provincia que comenzaría al día siguiente y llevaría 4 días, para el caso de Granada, otro día extra para llevar el vehículo hasta Almería y comenzaría su ruta almeriense al siguiente día y de igual forma para el caso de Jaén. De este modo solo se necesita un vehículo de 25.000 litros para recorrer todas las rutas de forma mensual.

7. BIBLIOGRAFÍA.

- Meyer, Christoph M. (2011). Vehicle Routing under Consideration of Driving and Working Hours. Lugar de edición: Alemania. Editorial- Gabler Verlag.
- Daza, J.M., Montoya, J.R. y Narducci, F. (2009).” Resolución del problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico de dos fases”. [En línea] <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n12/n12a03.pdf> . [Capturado: 11 de marzo de 2020]
- Ramírez Rodríguez, L.E. (2016). “Una solución al problema de ruteo de vehículos abierto (OVRP), implementando la heurística del vecino más cercano”. [En línea] <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/2985/1/RamirezRodriguezLuisErnesto.pdf> . [Capturado: 11 de marzo de 2020]
- Orrego Cardozo, J.P., Ospina Toro, D. y Toro Ocampo, E.M. (2006). “Solución al problema de ruteo de vehículos con capacidad limitada (CVRP) usando una técnica metaheurística”. [En línea] <https://www.redalyc.org/pdf/849/84950585004.pdf> . [Capturado: 12 de marzo de 2020]
- Algorítmica (2012-2013): “Algoritmos de Búsqueda Local Básicos”. [En línea] <https://sci2s.ugr.es/sites/default/files/files/Teaching/GraduatesCourses/Algoritmica/Tema02-BusquedaLocal-12-13.pdf> [Capturado: 20 de marzo de 2020]
- De la Hoz Domínguez, E., Peña Segura, K. y Mendoza Mendoza, A. (2013). “Solución al Problema de Ruteo de Vehículos Empleando Algoritmo Genético”. [En línea] <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5980478> [Capturado: 5 de enero de 2020]
- Herrera F. Universidad de Granada. “Introducción a los Algoritmos Metaheurísticos”. [En línea] <https://sci2s.ugr.es/sites/default/files/files/Teaching/OtherPostGraduateCourses/Metaheuristicas/Int-Metaheuristicas-CAEPIA-2009.pdf> [Capturado: 12 de enero de 2020]
- Universidad politécnica de Cartagena. (2012-2013) “Algoritmos de búsqueda local y algoritmos avariciosos”. [En línea] http://www.net2plan.com/teaching/files/PyGRC/P2/P2_planif_main_NORESUE_LTA.pdf [Capturado: 21 de enero de 2020]
- Ruiz Reina, J.L. (2012). “Búsqueda local y algoritmos genéticos”. [En línea] <https://www.cs.us.es/cursos/ia1/temas/tema-06.pdf> [Capturado: 5 de enero de 2020]
- Molina, D. y Herrera F. “Hibridación Iterativa de DE con Búsqueda Local con reinicio para problemas de alta dimensionalidad”. [En línea] <http://simd.albacete.org/actascaepia15/papers/00251.pdf> [Capturado: 3 de noviembre de 2019]

- Universitat Politècnica de València-UPV. (22 oct. 2018) “Introducción a las heurísticas de búsqueda local || UPV” [En línea] <https://www.youtube.com/watch?v=yhaHb8fYc1s> [Capturado: 15 de enero de 2020]
- Capítulo 5. “Búsqueda Tabú”. [En línea] <https://ccc.inaoep.mx/~emorales/Cursos/Busqueda/btabu.pdf> [Capturado: 20 de febrero de 2020]
- Molina Gomez, J.C. “Problema de Optimización de Rutas de Vehículos con Flota Heterogénea”. [En línea] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70512/fichero/2.-PROBLEMA+DE+OPTIMIZACION+DE+RUTAS+DE+VEHICULOS+CON+FLOTA+HETEROGENEA.pdf> [Capturado: 20 de enero de 2020]
- “Problema de Enrutamiento de Vehículos” (2020). [En línea] https://es.wikipedia.org/wiki/Problema_de_enrutamiento_de_veh%C3%ADculos [Capturado: 5 de febrero de 2020]
- Prato Torres, R., Suero Pérez D.F. y Guzmán Ávila O. J. (2015) “Ruteo de Vehículos desde un Centro de Distribución...” [En línea] <file:///C:/Users/mario/Downloads/Dialnet-RuteoDeVehiculosDesdeUnCentroDeDistribucionAUnaLin-5478780.pdf> [Capturado: 16 de marzo de 2020]
- Mirzajani M. (2018). “El Problema del Viajante” [En línea] <http://www.anem.es/2018/09/el-problema-del-viajante/> [Capturado: 21 marzo de 2020]
- P. Tothand, D. Vigo (eds.). “The Vehicle Routing Problem”. Edición:-. Editorial: Siam, Philadelphia.
- Golden, B. (2008). “The Vehicle Routing Problem: Lastest Advances and a New Chanllenges”. Edición:-. Editorial: Boston, MA: Springer Science + Buseness Media, LLC.
- Autor:-. “Vehicle routing: problems, methods, and applications”. 2nd ed. Editorial: Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics; Mathematical Optimization Society, 2014.
- Olafsson, S. (2006). “Metaheuristics”.

8. ANEXOS.

I. ALGORITMO PROPIO CREADO PARA ESTE TRABAJO.

Mediante el uso del programa Excel del paquete de Microsoft office hemos desarrollado un algoritmo para ir seleccionando nodos de forma consecutiva y de esta forma crear cuantas rutas se quiera y de forma automática.

No obstante, hay que remarcar que para el desarrollo de este trabajo de enrutamiento se han asignado una serie de pautas y restricciones al algoritmo. Las restricciones hacen que los caminos se formen añadiendo nodos, pero no de forma aleatoria, sino que, para añadir un nodo nuevo a la ruta, se tiene en cuenta el nodo del que se parte. De esta forma, el nodo elegido para añadirse a la ruta es uno escogido aleatoriamente de entre todos los nodos colindantes a este.

Esto ocurre porque elegir nodos totalmente aleatorios para formar rutas no tiene demasiado sentido desde el punto de vista de enrutamiento de vehículos, pues no es coherente visitar varios nodos alejados entre sí, sin pasar antes por los que están entre medias. Esto es exactamente lo que realiza el algoritmo, elige un nodo colindante para continuar el viaje.

Para realizarlo se han utilizado las funciones propias del programa:

- ❖ Para el desarrollo de la parte básica, la que va nombrando nodos se han utilizado:
 - INDICE
 - COINCIDIR
 - SUMA
 - SI
 - ALEATORIO.ENTRE
 - CONTARA
 - ELEGIR

A la izquierda, en azul, se muestra cuando la ruta contiene más de tres nodos distintos de la inicial, el nodo de partida, siempre y cuando la ruta acabe en el mismo nodo que el inicial, en este caso la capital de la provincia.

De esta forma, con el mecanismo o algoritmo junto con las restricciones y los indicadores que hemos creado, se puede fácilmente, arrastrar hacia abajo y crear rutas casi de forma infinita, y visualizar rápidamente las rutas que son buenas, o muy buenas. El único impedimento es la carga computacional que genera, por lo que con 2000 rutas en un solo arrastre hacia abajo es suficiente para obtener buenas rutas.

Decir que la codificación de las celdas para crear el mecanismo completo es algo complejo y entretenido, pero teniendo conocimiento de las funciones con las que Excel nos permite trabajar, no es demasiado difícil. En la imagen se puede observar un ejemplo de la codificación que tienen las celdas. Aparece en la parte de arriba en la sección de fórmula de Excel.

No hay que olvidar que se necesitan las matrices que aparecen en este trabajo de enrutamiento para cada provincia, pues estas son nuestros datos para ejecutar correctamente el algoritmo y las rutas.