

MODELO PARA LA DEFINICION DE RUTAS DE RECOGIDO DE ACEITE USADO DE COCINA EN PUERTO RICO, PARA LA ELABORACION DE BIODIESEL

por

Liliana Andrea Martínez Ulloa

Proyecto sometido en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

en

Sistemas Gerenciales

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO
RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ
2008

Aprobado por:

Mercedes Ferrer, MS.
Miembro del Comité Graduado

Fecha

Noel Artiles, Ph.D.
Miembro del Comité Graduado

Fecha

Pedro Resto Batalla, Ph.D.
Presidente del Comité Graduado

Fecha

Jaime Seguel, Ph.D.
Representante Estudios Graduados

Fecha

Agustín Rullán Toro, Ph.D.
Director de Departamento

Fecha

ABSTRACT

This project presents a model for the collection of used cooking oil as raw material for biodiesel production in Puerto Rico. We propose the use of a user friendly application in Excel, designed to approximately solve the capacitated vehicle routing problem (CVRP). The application gives cost-effective solutions, defines the daily assignment of routes for a fleet of vehicles with different capacities, determines transportation costs, and defines the routes in a timely manner allowing a considerable improvement in the daily planning of this task. This tool is specially tailored to the topography and the speed limits of the roads of Puerto Rico.

The objectives of this project is to reduce the cost of biodiesel production by reducing the raw material transportation costs and to reduce the water contamination caused by the residue of the cooking oil by improving the collection planning.

RESUMEN

Este trabajo presenta un modelo de recolección de aceites usados de cocina como materia prima para la fabricación de biodiesel en Puerto Rico. Se propone el uso de una herramienta en Excel fácil de utilizar por cualquier usuario, diseñada para dar una solución aproximada del problema de ruteo de vehículos capacitados (CVRP). Esta aplicación provee soluciones costo-efectivas en la asignación de rutas a visitar diariamente por una flota de vehículos con diversas capacidades, determina los costos de transporte, las rutas satisfaciendo restricciones de tiempo de los conductores, proporcionando así una mejora considerable en la planificación diaria de dicha tarea. La herramienta se adapta especialmente al sistema montañoso y a los límites de velocidad de las carreteras de Puerto Rico.

Con la elaboración de este proyecto se pretende reducir los costos de producción del biodiesel disminuyendo los costos de transporte de la materia prima y reducir la contaminación generada por el residuo del aceite usado de cocina en las aguas mejorando la planificación de su recogido.

©LILIANA ANDREA MARTÍNEZ ULLOA

DEDICATORIA

A lo mejor que me a dado la vida, mi familia.
Mis padres José Manuel y Carmenza por su apoyo y amor
incondicional, mi hermano José Luis por brindarme
su compañía, ayuda y por traer al mundo a Julieta,
mi sobrina adorada.

AGRADECIMIENTOS

Durante el tiempo de mis estudios de maestría en la Universidad de Puerto Rico muchas personas me han colaborado directa o indirectamente, por lo cual quiero dedicar esta sesión para reconocer su apoyo.

Quiero empezar con mi consejero el Dr. Pedro Resto quien me dio su apoyo incondicional, su guía y supervisión. A la profesora Mercedes Ferrer por pertenecer a mi comité, por sus concejos y colaboración. Al Dr. Noel Artiles por su gran ayuda con el problema de CVRP y por sus palabras de reto y apoyo, que sin él saberlo fueron en los momentos más oportunos. También al Dr. José Colucci por darme la oportunidad de trabajar en su laboratorio y en el proyecto Achievable Renewable Energy Targets for Puerto Rico's Renewable Energy Portfolio Standard.

A las secretarias del Departamento de Ingeniería Industrial, Mayra y Laura, por tener siempre una sonrisa y esa disposición de colaboración. A Edwin por su ayuda en el centro de computo. A mis compañeros y amigos Paola, Ana María, Victoria, Vera, Mayra, Karina, Edwin, Chucho, Andrés, Wilfredo, Dennis, Alejandro, Julián, Juan Guillermo, German y Bejarano por su ayuda, compañía y por los buenos momentos compartidos en este largo periodo de estudios. Un especial agradecimiento a Fabián por su ayuda, en mis momentos de desesperación, con el código de Visual Basic, también a Jaime Andrés por su colaboración.

Quiero agradecerle al Ingeniero Carlos González de la empresa Biodiesel & Fuels de Puerto Rico por su colaboración en las visitas a la planta y la información suministrada. Al Señor

Rene Fernández, al Ing. Ramiro Lozano y a mi amigo el Ing. Carlos Peña por iniciarme en el fantástico mundo del biodiesel.

A John por siempre estar pendiente de mis cosas, por su apoyo, ayuda, consejos y por ser el mejor amigo. A Keila y su familia por acogerme en su lindo hogar. A la familia Cruz Ulloa por reemplazar la parte familiar que tanto he extrañado en esta Isla. A Enith y Ana Grecia Méndez por adoptarme y hacerme sentir como una más de la familia. A Gilberto por estar a mi lado, darme su amor, apoyo y dedicación. A lo más importante en mi vida, mi familia, mis padres José Manuel y Carmenza, mi hermano José Luis y mi muñeca Julieta. A la Universidad de Puerto Rico Recinto Universitario de Mayagüez por acogerme y ofrecerme los medios para cumplir con esta meta. Por último, a Dios por darme capacidad, fortaleza y facilitarme el estar alejada de mi familia y de mi lindo país, Colombia.

Tabla de Contenido

ABSTRACT	II
RESUMEN	III
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS	VI
LISTA DE FIGURAS	XII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 CONTRIBUCIÓN	2
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 <i>Objetivo General</i>	3
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	3
2 REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 BIODIESEL	4
2.1.1 <i>Definición del biodiesel</i>	4
2.1.2 <i>Historia del biodiesel</i>	4
2.1.3 <i>Ventajas – Beneficios del uso del biodiesel</i>	4
2.1.3.1 <i>Ventajas tecnológicas del uso de biodiesel</i>	5
2.1.3.2 <i>Ventajas del uso de biodiesel para el medio ambiente</i>	6
2.1.4 <i>Desventajas del biodiesel</i>	6
2.1.5 <i>Proceso de producción del biodiesel</i>	7
2.1.6 <i>Usos del Aceite de cocina usado</i>	8
2.1.7 <i>Problemática del desecho del aceite de cocina usado.</i>	10
2.2 PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CAPACITADOS (CVRP)	10
2.2.1 <i>Ejemplo de problema de CVRP</i>	14
2.2.2 <i>Técnicas de Solución para CVRP</i>	16

3	METODOLOGÍA	20
3.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA CVRP	21
3.1.1	<i>Constantes del problema</i>	21
3.1.2	<i>Variables del problema</i>	22
3.1.3	<i>Función Objetivo</i>	22
3.1.4	<i>Restricciones:</i>	22
3.2	ANTECEDENTES DE LA RECOLECCIÓN DEL ACEITE DE COCINA USADO	24
3.2.1	<i>Identificación del proceso de recolección de aceite de cocina usado a nivel comercial y doméstico en otros países.</i>	24
3.2.2	<i>Identificación de normatividad y trabajos previos en la Isla referente a biodiesel y aceites usados de cocina.</i>	26
3.2.3	<i>Determinar el potencial de aceite usado a recoger en Puerto Rico; importaciones de Diesel y de aceites vegetales y grasas animales a la Isla.</i>	32
3.3	DETERMINACIÓN DE LOS PARTICIPANTES EN LA CADENA DE RECOLECCIÓN DEL ACEITE DE COCINA USADO	35
3.3.1	<i>Identificación de entidades a nivel gubernamental, industrial y universitario que intervienen en el tema del biodiesel y la recolección de aceites usados de cocina en Puerto Rico</i>	35
3.3.2	<i>Determinación de Fuentes de aceite usado y creación de base de datos.</i>	38
3.4	DISEÑO DEL MODELO QUE PROVEE SOLUCIONES COSTO-EFECTIVAS PARA LA RECOLECCIÓN DEL ACEITE USADO DE COCINA EN LA ISLA DE PUERTO RICO	42
3.4.1	<i>Desarrollo de herramienta que provee instrucciones a diario sobre los vehículos y rutas para recoger el aceite usado de cocina.</i>	42
3.4.1.1	<i>Flujograma de la Herramienta</i>	43
3.4.1.1.1	Proceso manual de la herramienta	43
3.4.1.1.2	Lógica de la herramienta	43
3.4.1.2	<i>Base de datos</i>	45
3.4.1.3	<i>Costos de transporte</i>	46
3.4.1.4	<i>Explicación de la aplicación</i>	47

3.4.1.5	<i>Presentación de resultados</i>	63
3.5	EVALUACIÓN DE LA HERRAMIENTA RESPECTO A EL BANCO DE PROBLEMAS DE CHRISTOFIDES Y EILON	71
	CONCLUSIONES	73
	TRABAJOS FUTUROS	75
	REFERENCIAS	78

ANEJO	NÚMERO
EL CALENTAMIENTO GLOBAL Y EL EFECTO INVERNADERO	I
TABLA DE ENERGÍAS RENOVABLES	II
TABLA DE BIOMASA	III
EMISIONES DEL BIODIESEL	IV
TABLA DE IMPORTACIONES DE PETRÓLEO Y PRODUCTOS DERIVADOS	V
IMPORTACIONES DE ACEITE Y GRASAS ANIMALES DESDE ESTADOS UNIDOS Y PAÍSES EXTRANJEROS A PUERTO RICO.	VI
TABLAS DE INGRESO DE ARBITRIOS SOBRE PRODUCTOS DE PETRÓLEO	VII
TABLA DE COSTOS DETALLADOS DE LOS VEHÍCULOS	VIII

LISTA DE TABLAS

Tablas	Pág.
Tabla 2-1. Recuperación de Aceites usados de cocina.	9
Tabla 2-2. Banco de Problemas de Christofides & Eilon	12
Tabla 2-3. Comparación de los mejores meta-heurísticos, basado en el porcentaje de desviación sobre la mejor solución encontrada.....	13
Tabla 2-4. Demanda de clientes para el problema S013-04e.....	15
Tabla 3-1. Cálculos realizados para estimar galones a reciclar.	32
Tabla 3-2. Cálculos realizados para estimar los galones que se hubieran podido reciclar.	33
Tabla 3-3. Comparación de información suministrada por la Junta de Planificación – Departamento de Hacienda - Resultados del proyecto de biodiesel en PR.	34
Tabla 3-4. Empresas que recolectan trampas de grasa.	37
Tabla 3-5. Sucursales de Fast Food en Puerto Rico.....	39
Tabla 3-6. Establecimientos en Puerto Rico según Departamento de Salud.	40
Tabla 3-7. Base de Datos de los restaurantes de Puerto Rico.....	41
Tabla 3-8. Base de datos de las Fuentes.	46
Tabla 3-9. Cuadro resumen de los Vehículos.	47
Tabla 3-10. Cuadro para agregar horas extras.	49
Tabla 3-11. Cuadro para agregar un vehículo extra.....	50
Tabla 3-12. Información de las fuentes a visitar por día.....	51
Tabla 3-13. Coordenadas de las zonas montañosas de Puerto Rico.	57
Tabla 3-14. Cuadro ruta Vehículo 4	65
Tabla 3-15. Cuadro ruta Vehículo 3	66
Tabla 3-16. Cuadro ruta Vehículo 2	66
Tabla 3-17. Cuadro ruta Vehículo 1	67
Tabla 3-18. Comparación entre los problemas de Christofides y Eilon contra MRAUC_PR.....	71
Tabla 0-1. Emisiones de biodiesel respecto a Diesel Convencional.....	IV

Lista de Figuras

Figuras	Pág.
Figura 2-1. Proceso de producción del biodiesel.....	7
Figura 2-2. Proceso de Transesterificación.....	8
Figura 2-3. Matriz de distancia entre nodos para el problema S013-04e.	15
Figura 2-4. Solución para el problema S013-04e.	16
Figura 2-5. Técnicas de solución para CVRP.....	16
Figura 3-1 Diagrama de Flujo de la Metodología del Proyecto.....	20
Figura 3-2. Costo de producción del biodiesel según MP utilizada.	30
Figura 3-3. Diagrama de flujo del proceso manual de la herramienta.....	43
Figura 3-4. Diagrama de flujo de la lógica de la herramienta	44
Figura 3-5. Menú MRAUC_PR.....	47
Figura 3-6. Forma Agregar Nueva Fuente.....	48
Figura 3-7. Forma Fuentes a Visitar	49
Figura 3-8. Nombre de hojas de trabajo por cada iteración.....	50
Figura 3-9. Mensaje de error demanda mayor a la capacidad de los vehículos.....	52
Figura 3-10. Determinación de número mínimo de vehículos	53
Figura 3-11. Matriz de Distancia	54
Figura 3-12. Opciones tipo de distancia	55
Figura 3-13. Mapa de las zonas montañosas de Puerto Rico.....	56
Figura 3-14. Determinar si un punto esta o no dentro de un polígono.	58
Figura 3-15. Matriz de Velocidad.....	59
Figura 3-16. Matriz de Tiempo.....	60
Figura 3-17. Mapa con rutas de todos los vehículos.....	63
Figura 3-18. Rutas de cada Vehículo.....	64
Figura 3-19. Mapa con ruta del vehículo 4.....	65
Figura 3-20. Mapa con ruta del vehículo 3.....	66
Figura 3-21. Mapa con ruta del vehículo 2.....	67

Figura 3-22. Mapa con ruta del vehículo 1	67
Figura 3-23. Cuadros Resumen por Vehículo.....	68
Figura 3-24. Cuadros Resumen para todos los Vehículo.....	69
Figura 3-25. Cuadro resumen de resultados de la herramienta.....	70
Figura 0-1. Capa protectora natural para la protección de los rayos solares	I
Figura 0-2. Acción de los rayos solares en la superficie terrestre.	II
Figura 0-3. Captura de radiación solar por parte de los gases de invernadero	II
Figura 0-4. Calentamiento global de la tierra	III

1 INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, se vive un aumento acelerado en la demanda del sistema energético, el cual no será sostenible a largo plazo, dado el impacto ambiental que genera en su producción a partir de materiales de origen fósil (ver Anejo I). Para reducir este impacto se está presentando un auge en el uso de las energías alternativas (ver Anejo II). Las energías renovables son poco competitivas al compararlas con las fuentes no renovables como el petróleo y el carbón. Por tal motivo, uno de los grandes desafíos que presentan, es reducir sus costos de producción [2]. Existen diversas herramientas en la Ingeniería Industrial que permiten ayudar a mejorar sus procesos de producción, reducir sus costos y lograr su viabilidad.

El uso de la biomasa (ver Anejo III) y especialmente de los biocombustibles, como el etanol y el biodiesel, ayudan a reducir la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera y disminuye la dependencia de muchos países con el petróleo.

Según estudios realizados en plantas de biodiesel el 70% de sus costos de producción corresponden a la materia prima [15], entre las cuales se encuentran: aceites vegetales como maíz, girasol, colza, soja, canola, mostaza, coco, oliva, palma, etc. (criticados por competir en el uso de la tierra para la producción entre energía y alimentos), los cultivos de micro-algas (necesitan una inversión muy alta para su producción) y por último los aceites de cocina usados, las grasas animales (sebo), desechos recolectados en las trampas de grasa de los restaurantes y las grasas que salen de las plantas de tratamiento de aguas. Estas últimas materias primas son excelentes para la elaboración del biodiesel, pero presentan dificultades logísticas en su recolección, debido a sus altos costos de transporte y pre-tratamientos de limpieza [55].

Entre los desechos generados por la Isla, se encuentra el aceite de cocina usado (residuo urbano que no tiene control ni normatividad para su recolección ni reutilización), el cual se puede reutilizar en la producción del biodiesel. Solucionando el problema que se genera al tirar por el desagüe este desecho, que es insoluble en agua, y que cuando se compacta tapa las tuberías. Cuando este desecho llega a los ríos y mares, genera una película superficial en el agua que impide el intercambio de oxígeno, altera el ecosistema, aumenta los costos en las plantas de tratamiento de agua y facilita la reproducción de bacterias y ratones en aguas estancadas [55].

1.1 Contribución

En el desarrollo de este proyecto se diseñó una herramienta que provee soluciones costo-efectivas para una mejor planificación en el recogido del aceite usado de cocina en Puerto Rico, considerando capacidades variables de los vehículos y la geografía de las rutas. Dicha herramienta es fácil de utilizar por los usuarios por lo que hay una probabilidad muy alta de que sea aceptada y usada por las empresas participantes.

Con la realización de este trabajo de investigación se contribuye de la siguientes forma:

- Determinar el potencial de aceite usado a recoger en Puerto Rico.
- Identificar los participantes en la cadena de recolección del aceite.
- Reducir los costos de producción del biodiesel, minimizando el costo de transitar las rutas para el recogido del aceite usado de cocina.
- Mostrar las oportunidades de negocios que existen en el manejo de residuos y reciclaje, que se pueden aprovechar para generar fuentes de empleo en la Isla.
- Motivar y crear conciencia de utilizar herramientas de Ingeniería Industrial para mejorar los procesos de producción de energías renovables para la Isla.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Diseño de una herramienta fácil de usar por los usuarios potenciales de tal forma que sea aceptada y usada, que provea asignaciones costo-efectivas de vehículos a las rutas de recolección del aceite usado de cocina en Puerto Rico.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar leyes y controles vigentes en Puerto Rico referente al reciclaje del aceite usado de cocina y los participantes en la cadena de recolección.
- Estimar el potencial de aceite usado de cocina disponible para recolectar.
- Identificar las fuentes donde se puede recolectar el aceite usado de cocina y creación de una base de datos.
- Determinar un modelo logístico tal que la asignación de vehículos a rutas busque reducir costos.
- Determinar las rutas de transporte de los vehículos proveyendo costo-efectividad en las distancias a recorrer de los vehículos que recogen el aceite usado de cocina.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Biodiesel

2.1.1 Definición del biodiesel

Combustible renovable derivado de aceites vegetales o grasas animales que puede ser utilizado como sustituto o aditivo del diesel convencional. La Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM) define al biodiesel como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de insumos grasos renovables, como los aceites vegetales o grasas animales [6]. El término bio hace referencia a su naturaleza renovable y biológica en contraste con el combustible diesel tradicional derivado del petróleo; mientras que diesel se refiere a su uso en motores de este tipo [30].

2.1.2 Historia del biodiesel

Los aceites vegetales como combustibles datan de 1900, cuando Rudolph Diesel lo utilizó por primera vez en su motor de ignición. Durante la segunda guerra mundial, y ante la escasez de combustibles fósiles. También se destacó la investigación realizada por Otto y Vivacqua en el Brasil, sobre diesel de origen vegetal, pero fue hasta el año de 1970, que el biodiesel se desarrolló de forma significativa a raíz de la crisis energética que sucedía en ese momento y al elevado costo del petróleo [37].

2.1.3 Ventajas – Beneficios del uso del biodiesel

Biodiesel es el único combustible alternativo en EE.UU que cumple con los requisitos de la EPA (Environmental Protection Agency), bajo la sección 211(b) del "Clean Air Act" [33].

La oficina del presupuesto del Congreso y el Departamento de Defensa, el Departamento Americano de Agricultura y otros organismos americanos han determinado que el biodiesel es la

opción más económica de combustible alternativo que reúne todos los requisitos del Energy Policy Act [33].

2.1.3.1 Ventajas tecnológicas del uso de biodiesel

- El biodiesel es el único combustible alternativo que puede usarse directamente en cualquier motor diesel, sin hacer ningún tipo de modificación.
- Se puede utilizar puro, denominado B100 (100% biodiesel) o mezclado con el diesel.
- El encendido, rendimiento, torque y potencia de los motores no varía significativamente, pero el consumo puede incrementarse hasta en un 5% ya que su energía específica es menor, lo que se puede compensar con la disminución en el desgaste del motor, por el alto poder de lubricidad del biodiesel que duplica la vida útil del motor. Concluyendo que el rendimiento energético de ambos combustibles es esencialmente el mismo.
- El biodiesel presenta dos ventajas frente a los aceites crudos y refinados, la primera es su alta pureza y la segunda es su viscosidad, esta última evita la formación de depósitos y la vaporización en frío.
- Puede ser bombeado, almacenado y manipulado con los mismos equipos, procedimientos e infraestructura que el diesel. Es más seguro de manipular gracias a su punto de inflamación elevado (150°C) comparado al diesel de petróleo (50 °C). No produce vapores explosivos.

2.1.3.2 Ventajas del uso de biodiesel para el medio ambiente

- El biodiesel puro es biodegradable, en menos de 21 días desaparece en la tierra, libre de azufre y compuestos aromáticos, sin importar significativamente el alcohol y el aceite vegetal que se utilice en su proceso de producción. Esto es importante para mantener un aire limpio.
- Es menos tóxico que la sal común de mesa. Su toxicidad en caso de ingestión es mínima, tanto en peces como en mamíferos.
- El biodiesel es obtenido a partir de aceites vegetales, totalmente renovables.
- Con el consumo de biodiesel se contribuye a la reducción del calentamiento global y en general al cuidado del medio ambiente y de la salud de los seres vivos.
- Menor nivel de emisión de gases nocivos, siendo nulas las emisiones de azufre y metales pesados, reduciendo las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) (ver Anejo IV).

2.1.4 Desventajas del biodiesel

La cadena de producción del biodiesel es muy larga lo que hace que el precio final se incremente mucho. Para conseguir un precio más competitivo es necesario optimizar el proceso de producción. Así se ahorraría en concepto de transporte y bajaría el precio del biodiesel en su lucha contra los combustibles fósiles. Aun que su contenido energético es de 7% menos que el diesel, esto se compensa con su alta viscosidad y sus cualidades lubricantes, es un aditivo y ayuda a limpiar el motor por dentro. Al limpiar el motor, los residuos hacen que los filtros gasolina se tapen. Es difícil de usar a altas temperaturas y como se ve en el anejo IV la emisiones de Óxido de Nitrógeno (NO_x) aumentan un 13 %.

2.1.5 Proceso de producción del biodiesel

La Figura 2-1 muestra el proceso de producción del biodiesel con aceite de cocina usado.

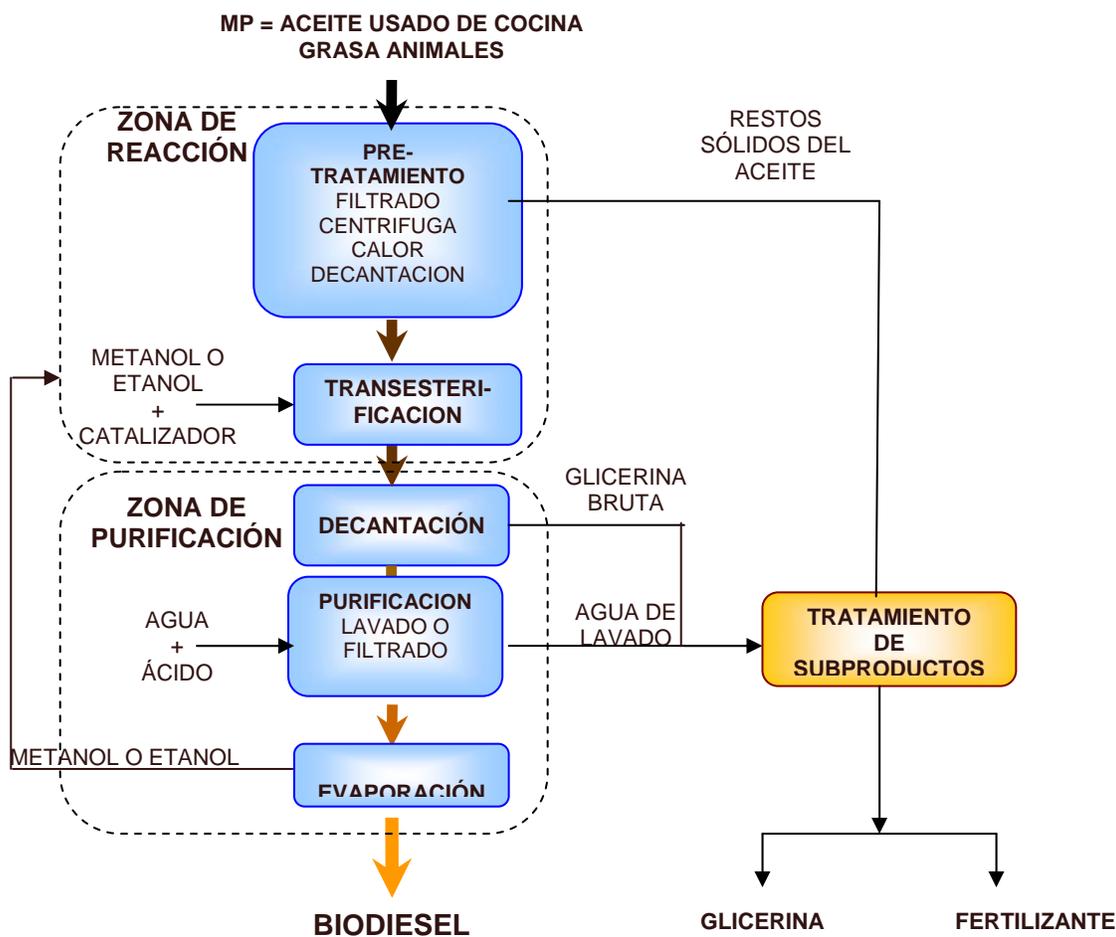


Figura 2-1. Proceso de producción del biodiesel

La Glicerina es un subproducto del proceso de elaboración del biodiesel. Obtenido a partir de la fermentación, la oxidación catalítica, la esterificación selectiva etc. A su vez de la glicerina, se pueden producir derivados que son utilizados en la elaboración de cosméticos, y la elaboración de medicamentos en forma de jarabes . Otros usos son:

- Como baño calefactor para temperaturas superiores a los 250 °C;
- Lubricación de maquinarias específicas. Por ejemplo, las de producción de alimentos y medicamentos (por no ser tóxica), de petróleo, etc.;

- Anticongelante (baja el punto de fusión del agua).
- Elaboración de resinas alquídicas.
- Aditivos alimentarios, especialmente para animales de granja.
- Detergentes, etc.

La Figura 2-2 describe la etapa de transesterificación en la producción de biodiesel.

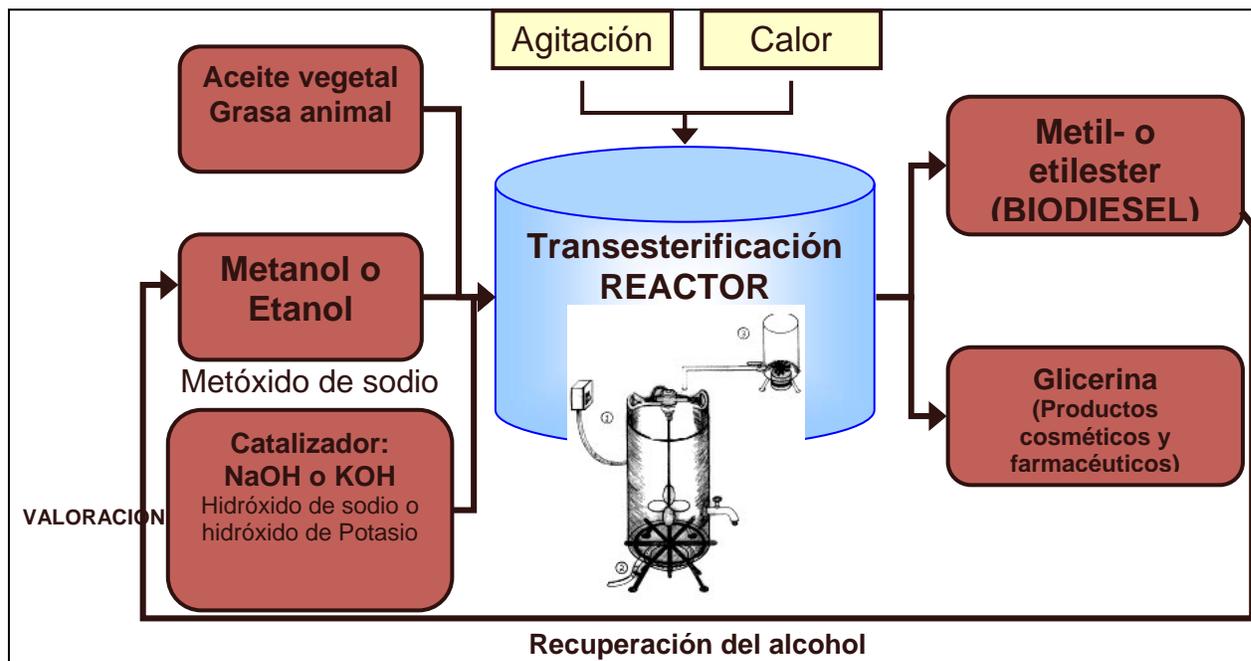


Figura 2-2. Proceso de Transesterificación

En la transesterificación el hidróxido de sodio y el metanol se unen para formar metóxido de sodio ($\text{Na}^+ \text{CH}_3\text{O}^-$). Cuando se mezcla el metóxido con aceite, rompe las uniones de la molécula de aceite, liberando glicerina y ácidos grasos. Estos últimos se unen al metanol formando biodiesel, y algunas veces un poco de jabón. Si se utiliza metanol el producto final se llama metiléster, y si se utiliza etanol se llama etiléster [13].

2.1.6 Usos del Aceite de cocina usado

La Tabla 2-1 muestra los diferentes usos que se le da actualmente al aceite de cocina usado.

Tabla 2-1. Recuperación de Aceites usados de cocina.

EMPRESAS QUÍMICAS	ABONOS ORGANICOS	INDUSTRIA COSMETICA
Alimentos para animales (Prohibido en Europa)	Compostaje	Jabones
Ceras, Velas, Barnices, Pinturas. etc	Compostaje + Lombricultura	Detergentes
Lubricantes Directamente como combustible		
Biodiesel		

Hasta hace poco, el aceite vegetal usado también se utilizaba en la elaboración de alimentos para animales, pero la crisis provocada por la contaminación por dioxinas de pollos en Bélgica desencadenó la prohibición de esta práctica en toda Europa.

Al utilizar el aceite de cocina usado directamente como combustible en vehículos, se detectaron los siguientes problemas:

- Problema para el arranque en frío, por su alta viscosidad.
- Da lugar a la formación de depósitos de gomas en los inyectores, lo cual acaba propiciando el fallo del motor.
- Produce agentes que generan polución, tales como acroleínas y aldehídos.

Estos problemas se evitan transformándolo en sus ésteres de metilo, los cuales se conocen como biodiesel, que tiene una viscosidad de 6 a 10 veces menor que el aceite de cocina usado.

2.1.7 Problemática del desecho del aceite de cocina usado.

En muchas industrias y comercios existe un problema ambiental generado por el mal manejo del aceite usado, debido a la gran informalidad y falta de alternativas técnicas, produciendo graves problemas de contaminación.

El inadecuado manejo de los aceites usados, sumado a la falta de conciencia y cultura ambiental de los ciudadanos y empresarios, a la carencia de normatividad y a la falta de sistemas formales de almacenamiento, recolección y aprovechamiento del aceite usado, ocasiona, entre otras causas, los siguientes problemas a nivel mundial [55]:

- La contaminación de las aguas por derrames y disposición inadecuada de aceites usados.
- La contaminación del aire por la quema de aceites usados como combustibles, sin la tecnología ambiental necesaria (ladrilleras, fundiciones, saunas, vehículos, etc.).
- El deterioro de tuberías y alcantarillado por la presencia excesiva de aceites usados. Estos aceites generan atoro de las tuberías por la solidificación de las grasas, especialmente en pendientes planas.
- El incremento de los costos de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales.
- Es alimento de fauna como roedores, cucarachas y otros, aumentando el crecimiento poblacional de estas especies.
- Es caldo de cultivo de microbios peligrosos para la salud pública.

2.2 Problema de Ruteo de Vehículos Capacitados (CVRP)

El costo logístico asociado con el transporte es uno de los ítems que tiene mayor incidencia sobre el valor transferido al usuario final [8]. Esto implica costos en la flota de vehículos como son: su mantenimiento, amortización, combustible, seguros y contratación de conductores entre otros. Por esta razón la minimización de los costos relacionados con la recolección o entrega de productos a los clientes desde la planta o almacén, han sido ampliamente estudiados.

El problema de ruteo de vehículos capacitados más conocido como “Capacitated Vehicle Routing Problem”, CVRP por sus siglas en inglés es una de las variantes de la vasta familia de problemas de ruteo de vehículos (VRP) [50]. En CVRP se requiere encontrar las rutas que van a recorrer un conjunto de vehículos al visitar una lista de clientes o nodos, de tal forma que cada cliente se encuentre en una de las rutas y que los pedidos de los mismos sean satisfechos por los vehículos que los visitan, sin sobrepasar su capacidad máxima. El objetivo es minimizar la distancia total recorrida por la flota de vehículos.

Al igual que la mayoría de los problemas de optimización combinatoria del tipo VRP, el problema CVRP es de complejidad NP-complejo. Esto es así, porque el número de posibles soluciones crece exponencialmente con el número de nodos (clientes o para el caso del proyecto, las fuentes a visitar) y rápidamente sobrepasa las capacidades de cálculo de los ordenadores más potentes, dada su gran complejidad numérica. Los problemas de CVRP son solucionados principalmente con métodos heurísticos y meta-heurísticos debido a que emplean un tiempo de computación más corto al empleado por los métodos exactos de resolución [47].

Toda la literatura encontrada de los CVRP busca encontrar la mejor solución óptima en el menor tiempo, de un conjunto de problemas preestablecidos por Christofides & Eilon (1969) que se muestran en la Tabla 2-2 [48].

Tabla 2-2. Banco de Problemas de Christofides & Eilon

Problems	Number of customers	Vehicle capacity	Maximum tour length	Service time	Best published solution
<i>Random problems</i>					
1	50	160	∞	0	524.61
2	75	140	∞	0	835.26
3	100	200	∞	0	826.14
4	150	200	∞	0	1028.42
5	199	200	∞	0	1291.45
6	50	160	200	10	555.43
7	75	140	160	10	909.68
8	100	200	230	10	865.94
9	150	200	200	10	1162.55
10	199	200	200	10	1395.85
<i>Clustered problems</i>					
11	120	200	∞	0	1042.11
12	100	200	∞	0	819.56
13	120	200	720	50	1541.14
14	100	200	1040	90	866.37

La Tabla 2-3 muestra los resultados obtenidos por Tarantilis, Ioannou y Prastacos [48] en donde comparan la calidad de cada solución y el desempeño computacional de los algoritmos más conocidos que resuelven el CVRP.

Tabla 2-3. Comparación de los mejores meta-heurísticos, basado en el porcentaje de desviación sobre la mejor solución encontrada.

Pr.	Osman SA (BA) VAX 8600		Osman-TS (BA) VAX 8600		Taillard	Xu and Kelly DEC ALPHA ark/on		Rochat and Taillard		Flower HP9000		Granular TS Pentium 200		Improved AS Pentium 100		Rego-parallel 4 SUN Spark 4		Savings AS Pentium III 900						
	Value		Value		Value	Value		Value		Value		Value		Value		Value		Value						
	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time					
1	0.65	0.1	0.00	1.0	0.00	0.00	29.2	0.00	0.04	0.2	0.00	0.8	0.00	0.1	0.00	1.1	0.00	0.1	0.00					
2	0.40	59.4	1.05	0.8	0.00	0.00	48.8	0.00	1.41	0.4	0.40	2.2	1.08	1.3	0.01	43.4	0.40	0.3	0.00					
3	0.37	102.9	1.44	14.9	0.00	0.00	71.9	0.00	0.71	0.9	0.29	2.4	0.75	3.8	0.17	26.3	0.31	1.4	0.00					
4	2.88	71.6	1.55	29.4	0.00	0.11	149.9	0.00	1.83	1.9	0.46	4.5	3.22	5.0	1.55	48.4	1.13	8.4	0.00					
5	6.55	22.9	3.31	28.4	0.57	0.55	272.5	0.00	4.62	7.1	2.07	7.5	4.03	9.2	3.34	77.1	0.94	33.2	0.00					
6	0.00	11.6	0.00	1.0	0.00	0.00	30.7	0.00	0.69	0.1	0.00	0.9	0.87	18.4	0.00	2.4	0.00	0.1	0.00					
7	0.00	5.2	0.15	2.4	0.00	6.15	272.5	0.00	1.38	0.5	1.21	2.8	0.72	87.6	0.00	20.6	0.00	0.4	0.00					
8	0.09	6.1	1.39	32.7	0.00	1.75	98.2	0.00	1.27	1.4	0.41	2.9	0.09	0.1	0.09	18.9	0.11	1.5	0.00					
9	0.14	983.6	1.85	41.2	0.00	-	u/n	0.00	2.47	6.1	0.91	5.7	2.88	1.7	0.14	29.9	0.76	9.9	0.00					
10	1.58	40.3	3.23	67.1	0.15	3.11	368.4	0.00	4.66	5.1	2.86	9.1	4.00	4.8	1.79	42.7	1.45	39.3	0.00					
11	12.85	4.4	0.09	13.0	0.00	0.00	91.2	0.00	0.95	4.0	0.07	3.2	2.22	5.8	0.00	11.2	0.00	3.4	0.00					
12	0.79	0.8	0.01	5.7	0.00	0.00	56.6	0.00	0.25	0.5	0.00	1.1	0.00	11.0	0.00	1.6	0.00	1.3	0.00					
13	0.31	76.2	0.31	26.3	0.00	5.02	201.8	0.00	1.10	3.7	0.28	9.3	1.22	27.5	0.59	2.0	0.26	7.2	0.00					
14	2.73	5.0	0.00	9.7	0.00	5.64	153.0	0.00	0.16	0.8	0.00	1.4	0.08	81.8	0.00	24.7	0.00	1.4	0.00					
Aver. (%)	2.09		1.03		0.05		1.60		0.00	1.54		0.64		1.51		0.55		0.38						
Pr.	TabuRoute Silicon Graphics			Prins Pentium 500				BATA Pentium II 400MHz		LBTA Pentium II 400MHz		UTSA Sun Ultrasparc 10 440MHz		BoneRoute Pentium II 400		Baker and Ayechev Pentium 266		SEPAS Pentium II 400 MHz				D-Ants Pentium 900		
	Standard			Standard		Best value		Standard		Standard		Standard		Standard		Standard		Standard		Best value		Standard		
	Value	Time	Value	Value	Time	Value	Time	Value	Time	Value	Time	Value	Time	Value	Time	Value	Time	Value	Time	Value	Time	Value	Time	
1	0.00	6.0	0.00	0.00	0.1	0.00	0.00	0.8	0.00	2.0	0.00	4.6	0.00	0.1	0.00	0.4	0.00	0.4	0.00	0.00	u/n	0.00	u/n	
2	0.06	53.8	0.01	0.00	3.1	0.00	0.51	2.1	0.35	2.2	0.02	7.3	0.00	4.6	0.43	10.3	0.00	4.9	0.00	0.64	u/n	0.64	u/n	
3	0.40	8.4	0.00	0.00	8.3	0.00	0.51	3.2	0.49	3.2	0.40	11.2	0.00	7.7	0.40	12.0	0.00	8.6	0.00	0.25	u/n	0.25	u/n	
4	0.75	58.8	0.26	0.31	32.6	0.20	0.85	6.4	0.74	6.5	0.97	18.7	0.12	9.1	0.62	32.7	0.11	9.9	0.00	0.89	u/n	0.89	u/n	
5	2.42	90.9	1.54	0.68	56.1	0.38	2.09	11.3	2.04	17.3	1.12	28.1	1.55	17.0	2.23	87.7	1.55	13.1	1.55	1.21	u/n	1.21	u/n	
6	0.00	13.5	0.00	0.00	1.8	0.00	0.00	1.1	0.00	0.7	0.00	4.6	0.00	0.1	0.00	7.2	0.00	0.4	0.00	0.00	u/n	0.00	u/n	
7	0.39	54.6	0.00	0.29	5.6	0.00	0.00	3.2	0.00	2.5	0.00	7.6	0.00	1.5	0.00	7.5	0.00	1.0	0.00	0.86	u/n	0.86	u/n	
8	0.00	25.6	0.00	0.00	11.1	0.00	0.31	5.1	0.17	4.3	0.05	11.2	0.00	5.4	0.20	31.7	0.00	3.8	0.00	0.00	u/n	0.00	u/n	
9	1.31	71.0	0.03	0.15	38.7	0.00	1.04	6.7	0.98	6.8	0.80	19.2	0.06	7.9	0.32	37.4	0.06	6.7	0.06	0.98	u/n	0.98	u/n	
10	1.62	99.5	0.64	1.74	88.0	0.50	1.61	27.2	1.80	26.2	1.40	29.7	0.81	19.9	1.96	107.2	0.81	21.5	0.81	1.41	u/n	1.41	u/n	
11	3.01	22.2	0.00	0.00	13.1	0.00	0.00	4.0	0.00	4.1	3.07	14.2	0.00	0.4	0.46	24.7	0.00	0.3	0.00	0.13	u/n	0.13	u/n	
12	0.00	16.0	0.00	0.00	0.1	0.00	0.00	1.1	0.00	1.4	0.00	11.0	0.00	0.3	0.00	21.4	0.00	0.3	0.00	0.00	u/n	0.00	u/n	
13	2.12	59.2	0.31	0.12	35.7	0.11	0.43	14.3	0.40	14.5	1.80	14.5	0.19	9.5	0.34	17.7	0.19	7.5	0.19	0.37	u/n	0.37	u/n	
14	0.00	65.7	0.00	0.00	9.9	0.00	0.00	4.2	0.00	3.4	0.02	10.7	0.00	0.6	0.09	9.8	0.00	0.4	0.00	0.00	u/n	0.00	u/n	
Aver. (%)	0.86		0.20		0.24		0.53		0.50		0.69		0.23		0.50		0.19		0.18		0.48		0.48	

Es importante aclarar que el tipo de problema que se soluciona en este proyecto maneja capacidades variables de la flota de vehículos y que toda la literatura encontrada presume capacidades vehiculares constantes, no atienden directamente la relación entre rutas y vehículos (cualquier vehículo a cualquier ruta). En este proyecto se pretende que los vehículos más livianos visiten las áreas montañosas de la isla. Finalmente las herramientas existentes requieren programación específica y pudieran requerir un tiempo computacional excesivo y lo que se necesita es que diariamente, en la mañana, un empleado de la empresa, como por ejemplo una secretaria, determine las rutas que van a tomar los conductores de cada vehículo. Por tanto la facilidad de uso de la herramienta es crucial para contribuir en el recogido del aceite usado de cocina y la producción de biodiesel.

2.2.1 Ejemplo de problema de CVRP

Toth y Vigo (2002) [50] clasificaron este tipo de problema con la siguiente notación S013-04e, donde S significa que el problema tiene una matriz simétrica con distancias no Euclidianas, 013 significa que tiene 13 nodos, incluyendo el depósito, 04 que hay 4 vehículos y la e implica que el ejemplo procede del conjunto de problemas de Christofides & Eilon. También establece que la capacidad para todos los vehículos es igual, de 6,000 galones.

La Figura 2-3 muestra un ejemplo de la matriz de distancias del problema S013-04e. La Tabla 2-4 muestra un ejemplo de la demanda de cada nodo para este tipo de problema S013-04e. Por último, la Figura 2-4 muestra un ejemplo de la solución para el problema S013-04e [41].

c_{ij}		j												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
i	0		9	14	23	32	50	21	49	30	27	35	28	18
	1			21	22	36	52	24	51	36	37	41	30	20
	2				25	38	5	31	7	36	43	29	7	6
	3					42	12	35	17	44	31	31	11	6
	4						22	37	16	46	37	29	13	14
	5							41	23	10	39	9	17	16
	6								26	21	19	10	25	12
	7									30	28	16	27	12
	8										25	22	10	20
	9											20	16	8
	10												10	10
	11													10

Figura 2-3. Matriz de distancia entre nodos para el problema S013-04e.

Tabla 2-4. Demanda de clientes para el problema S013-04e.

Client (i)	Demand (d_i)
1	1200
2	1700
3	1500
4	1400
5	1700
6	1400
7	1200
8	1900
9	1800
10	1600
11	1700
12	1100

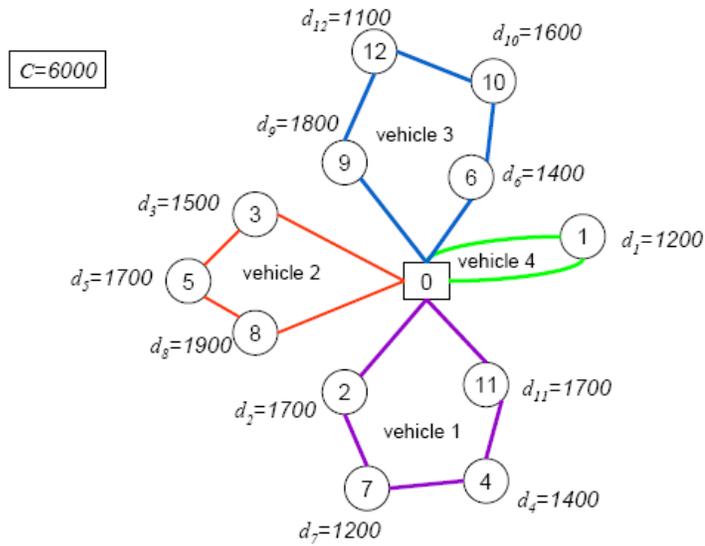


Figura 2-4. Solución para el problema S013-04e.

2.2.2 Técnicas de Solución para CVRP

La literatura menciona los siguientes métodos de resolución, los cuales se resumen en la

Figura 2-5:

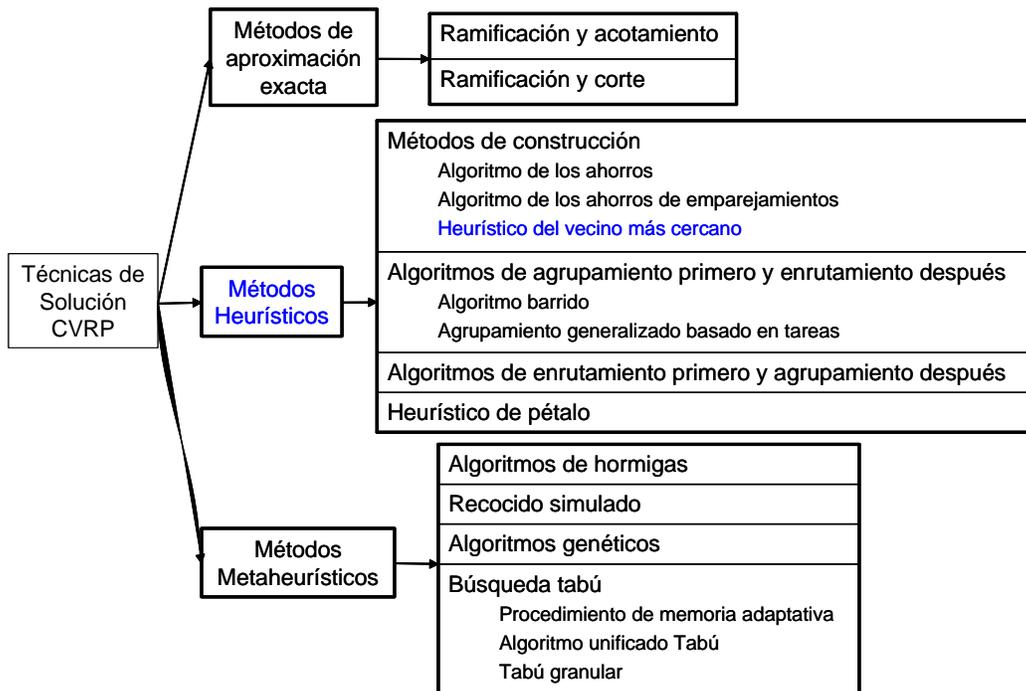


Figura 2-5. Técnicas de solución para CVRP

1. Métodos de aproximación exacta: garantizan encontrar una solución óptima y se clasifican en:

- Ramificación y acotamiento:
 - “A matching based exact algorithm for capacitated vehicle routing problems”.
ORSA Journal on Computing. (Miller, D. L., 1995) [31].
- Ramificación y corte
 - “Computational results with a branch and cut code for the Capacitated Vehicle Routing Problem”. Technical Report RR949-M, Université Joseph Fourier, Grenoble, France. (Augerat, P., Belenguer, J., Benavent, E., Corberán, A., Naddef, D., & Rinaldi, G.,1995) [3].
 - “Branch-and-cut algorithms for the Capacitated VRP”. In Toth, P. & Vigo, D. (eds.), The Vehicle Routing Problem. SIAM. (Naddef & Rinaldi, 2002) [32].
 - “An exact algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem based on a two-commodity network flow formulation”. Operations Research. (Baldacci, Hadjiconstantinou & Mingozzi, 2004) [7].
 -

2. Métodos Heurísticos: realizan una exploración limitada en el espacio de soluciones. Producen soluciones razonablemente buenas con tiempos de computación relativamente cortos, se clasifican en:

- Métodos de construcción: construyen de forma gradual una solución factible a la vez que tratan de minimizar el costo. Entre estos se encuentran:
 - Algoritmo de los ahorros: “Scheduling vehicles from a central depot to a number of delivery points. Operations Research”. (Clark & Wright, 1964) [14].

- Algoritmo de los ahorros de emparejamientos: “Parallel savings based heuristic for the delivery problem. Operations Research”. (Altinkemer & Gavish, 1991) [1]; “A repeated matching heuristic for the vehicle routing problem. Journal of the Operational Research Society”. (Wark & Holt, 1994) [54].
 - Heurístico del vecino más cercano: “An Analysis of Several Heuristics for the Traveling Salesman Problem”. (Rosenkrantz, Stearns & Lewis,1977) [43]; “Classical heuristics for the Capacitated VRP”. (Semet, F. & Laporte, G.,2002) [45].
 - Algoritmos de agrupamiento primero y enrutamiento después.
 - Algoritmo barrido: “A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem”. Operations Research. (Gillett & Miller, 1974) [27].
 - Agrupamiento generalizado basado en tareas: “A generalized assignment heuristic for the vehicle routing problem”. Networks. (Fisher & Jaikumar, 1981) [23].
 - Algoritmos de enrutamiento primero y agrupamiento después: “Route-first cluster-second methods for vehicle routing”. Omega. (Beasley, 1983) [9].
 - Heurístico de pétalo: “An integer programming approach to the vehicle scheduling problem”. Operations Research. (Foster & Ryan, 1976) [25]; “Extensions of the petal method for vehicle routing”. Journal of the Operational Research Society. (Ryan, Hjorring & Glover, 1993) [44].
3. Métodos Meta-heurísticos: realizan una exploración intensiva del espacio de soluciones. La calidad de sus soluciones son mayores que la obtenida por los heurísticos clásicos.

- Algoritmos de hormigas: “An improved ant system algorithm for the vehicle routing problem”. Annals of Operations Research. (Bullnheimer, Hartl & Strauss, 1999) [11].
- Recocido simulado: “Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problems”. Annals of Operations Research. (Osman, 1993) [36]; “Threshold accepting: a general purpose optimization algorithm”. Journal of Computational Physics. (Dueck & Scheurer, 1990) [22]; “New optimization heuristics: the great deluge algorithm and the record-to-record travel”. Journal of Computational Physics. (Dueck, 1993) [21]; “A Irvid simulated annealing for capacitated vehicle routing problems with the independent route length”. Applied Mathematics and Computation. (Tavakkoli, N. Safaei, & Y. Gholipour , 2006) [49].
- Algoritmos genéticos: “A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem”. Computers & Operations Research. (Prins, 2004) [39].
- Búsqueda tabú: “Metaheuristics for the Capacitated VRP”. In Toth, P. & Vigo, D. The Vehicle Routing Problem. SIAM. (Gendreau, Laporte & Potvin, 2002) [26].
 - Procedimiento de memoria adaptativa: “Probabilistic diversification and intensification in local search for vehicle routing. Journal of Heuristics. (Rochat & Taillard, 1995) [40].
 - Algoritmo unificado Tabu: “A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows”. Journal of the Operational Research Society. (Cordeau, Laporte & Mercier, 2001) [18].
 - Tabú granular: “The granular tabu search and its application to the vehicle-routing problem”. INFORMS Journal on Computing. (Toth & Vigo, 2003) [51].

3 METODOLOGÍA

Posterior a la revisión de literatura, donde se definen los conceptos básicos del biodiesel, sus ventajas y desventajas, el proceso de producción, el mercado en el mundo del biodiesel, usos y problemática del desecho del aceite de cocina usado y conceptos básicos del problema de ruteo de vehículos capacitados, se desarrolla la metodología escogida para el proyecto, la cual se muestra en el siguiente flujograma:

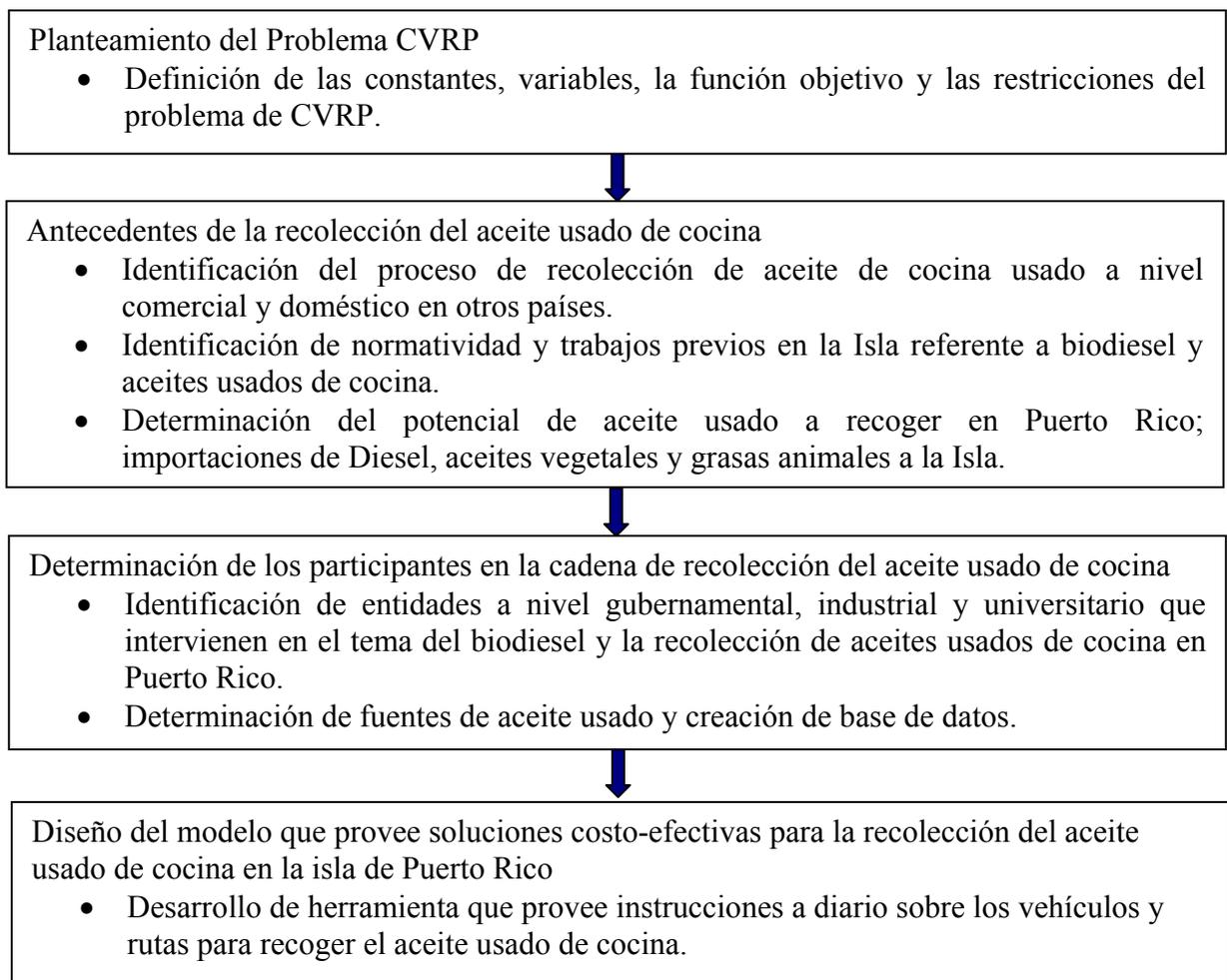


Figura 3-1 Diagrama de Flujo de la Metodología del Proyecto

3.1 Planteamiento del Problema CVRP

Aunque no se utilizó un modelo de optimización para resolver el problema de definir las rutas de los vehículos, sí se definió un posible modelo que podría ser usado en una futura investigación, que no requiera un tiempo de respuesta tan rápida como es el caso de este proyecto. Es importante mencionar que todos los conceptos de esta sección fueron utilizados para el desarrollo de la aplicación en Excel.

3.1.1 Constantes del problema

- n : número de nodos a visitar diariamente
- m : número de vehículos disponibles diariamente.
- i y j : nodos a visitar diariamente que pueden tomar el valor de 0 hasta n ($0 =$ planta).
- k : Vehículos que pueden ir de 1 hasta m .
- m_{\min} : número mínimo de vehículos para cubrir la demanda diaria.
- D_i : demanda diaria del nodo i .
- Q_k : capacidad del vehículo k .
- CV_k : Costo del vehículo k por milla.
- $Dist_{ij}$: Distancia en millas entre el nodo i y el nodo j .
- Vel_{ij} : Velocidad, en millas por hora, permitida para viajar entre el nodo i y el nodo j .
(Mecanismo para penalizar los nodos que se encuentran en el área montañosa de la Isla).
- T_{ij} : Tiempo de recorrido entre el nodo i y el nodo j .
- TS : Tiempo de servicio por nodo = 20 minutos aprox.
- TC : Tiempo disponible por conductor 7 horas = 420 min.

3.1.2 Variables del problema

- $Visita_{ik}$ = 1 Si el vehículo k viaja al nodo i. = 0 De lo contrario
- $Ruta_{ijk}$ = 1 Si el vehículo k viaja del nodo i al nodo j. = 0 De lo contrario
- U_{jk} : es igual al orden del nodo j en la secuencia de la ruta del vehículo k. $U_{1k} = 0$ señala al origen de la ruta para el vehículo k.

3.1.3 Función Objetivo

Minimizar el costo total de todos los arcos recorridos en la solución. El modelo desarrollado en este proyecto intenta minimizar los tiempos de recorrido. Esta matriz de tiempos sale de la división de los valores de la matriz de distancia sobre los valores de la matriz de velocidad. Su objetivo es penalizar los nodos ubicados en las zonas montañosas de Puerto Rico, para que los vehículos que tengan menos capacidad se vayan por estas zonas.

Min (Costos de la planta al primer nodo + Costo de la ruta + Costo del último nodo a la planta).

$$\sum_{k=1}^m \left(\sum_{j=1}^n Dist_{oj} * Ruta_{ojk} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Dist_{ij} * Ruta_{ijk} + \sum_{j=1}^n Dist_{jo} * Ruta_{jok} \right) * CV_k$$

3.1.4 Restricciones:

1. Cada nodo deberá ser atendido únicamente por un vehículo y todos los clientes tienen que ser atendidos.

$$\sum_{k=1}^m Visita_{ik} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

2. Se llega al nodo i por una sola ruta.

$$Visita_{ik} = \sum_{j=0, j \neq i}^n Ruta_{jik} \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ y } k = 1, 2, \dots, m$$

3. Dado un vehículo k y un nodo i , ese vehículo k si pasa por i , solo puede venir de un nodo

$$j. \quad \sum_{j=0, j \neq i}^n Ruta_{jik} \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ y } k = 1, 2, \dots, m$$

4. Ningún vehículo puede exceder su capacidad.

$$\sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^n D_i * Visita_{ik} + D_j \right) \leq Q_k \quad k = 1, 2, \dots, m$$

5. El vehículo que entra a un nodo sale de este.

$$\sum_{j=0, j \neq i}^n Ruta_{jik} = \sum_{j=0, j \neq i}^n Ruta_{ijk} \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ y } k = 1, 2, \dots, m$$

6. Eliminación de subrutas para el vehículo k [52].

$$U_{jk} - U_{ik} \geq M(Ruta_{ijk} - 1) + 1 \quad i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n \text{ y } k = 1, 2, \dots, m$$

Esta restricción utiliza la variable U_{jk} para representar la posición del nodo j en la secuencia de recogido del vehículo k . Cuando el vehículo viene del nodo i al nodo j , U_{ik} es menor por uno que U_{jk} . Al vehículo k usar el arco (i,j) , o sea, $Ruta_{ijk} = 1$, el lado derecho de la restricción simplifica a 1. Cuando el arco (i,j) no se utiliza porque i y j no están contiguos en la secuencia, $Ruta_{ijk} = 0$, el lado izquierdo pudiera ser positivo (si i precede a j) o negativo (si i sucede a j) pero como $Ruta_{ijk}$ es cero, el lado derecho es un número negativo grande (M es un número positivo grande) por lo cual se satisface la restricción. En caso de que $Ruta_{ijk}$ tome el valor de uno, la restricción no se cumple, evitando así las subrutas.

7. Ningún vehículo puede exceder el tiempo disponible para hacer el recorrido (TC = 420 minutos). (Tiempo de la planta al primer nodo + Tiempos de la ruta + Tiempo de regreso del vehículo a la planta)

$$\sum_{j=1}^n T_{ojk} * Ruta_{ojk} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n T_{ijk} * Ruta_{ijk} + \sum_{j=1}^n T_{jok} * Ruta_{jok} + TS * \sum_{i=1, i \neq 0}^n Visita_{ij} \leq TC \quad \forall k$$

8. Mínimo número de vehículos necesarios para atender todos los clientes. En la literatura se encuentra que algunos utilizan el algoritmo de Bin Paking (Gengreau, Laporte, & Semen, 2004) [26], pero para este proyecto no se puede utilizar porque este solo se puede aplicar a problemas en los que sus vehículos tengan capacidades iguales.

$$\sum_{k=1}^m Q_k \geq \sum_{i=1}^n D_i \quad m_{\min} \leq m$$

3.2 Antecedentes de la recolección del aceite de cocina usado

- 3.2.1 Identificación del proceso de recolección de aceite de cocina usado a nivel comercial y doméstico en otros países.

Este procedimiento ha alcanzado tanto éxito a nivel mundial que ya existen muchas plantas para producción de biodiesel a partir de esta materia prima con capacidades importantes. En Estados Unidos, el proyecto de biodiesel obtenido a partir de aceites comestibles gastados, se enfocó en un principio bajo el lema de independencia energética, produciendo biodiesel a nivel casero o por grupos pequeños. Pero hoy el porcentaje de las plantas existentes en Estados Unidos que producen biodiesel a partir de aceite de cocina usado es muy alto, la gran mayoría están adaptadas para recibir diferente tipos de materia prima.

En Europa, el uso de biodiesel ha alcanzado niveles industriales mayores como parte de los programas de control de emisiones. Como ejemplo se puede destacar España, donde se vieron forzados en utilizar este residuo para la producción de biodiesel por la crisis de los pollos belgas en el año 2000, ya que no podían ser destinados a la fabricación de piensos para animales, como hasta entonces lo habían hecho.

Según el informe “Una Estrategia de Biocarburantes para España (2005-2010)” [38], las estrategias utilizadas en España para la recolección de este producto son:

- Unidades móviles: vehículos de recolección y transporte que se desplazan hasta las diferentes áreas poblacionales seleccionadas en la comunidad, según un calendario establecido.
- Puntos fijos: ubicando contenedores de recolección de aceites vegetales usados en calles y plazas en zonas predeterminadas.
- Comunidades de vecinos: se reparte entre los vecinos participantes envases individuales de recolección, además de ubicar contenedores dentro de los propios edificios y urbanizaciones.
- Colegios: se reparte entre los alumnos participantes envases individuales de recolección, además de ubicar contenedores dentro de los colegios.

Algunas de las empresas que prestan el servicio de recolección gratuito de este residuo en España son: Saviso, Ecogras, Resigras, Reagras, Gave S.L., Reciclados La Estrella. En resumen algunas de las estrategias utilizadas por estas empresas, para prestar el servicio de recolección del aceite de cocina usado en sector comercial y doméstico, se encuentran:

- Servicio gratuito.
- Entrega gratuita de envases estándar, que son retirados y cambiados por otro envase limpio e higienizado.
- Cada fuente establece la frecuencia de recolección, previo acuerdo entre las partes, o vía telefónica, e-mail y página Web.
- Servicio de recolección móvil, al alcance de todos los ciudadanos.
- Firman un contrato de prestación de servicio de recolección.
- Se entregan certificados con los retiros realizados.
- Instalan contenedores que permiten la recolección de estos residuos por parte de usuarios en sectores domésticos. Estos contenedores están diseñados para evitar todo tipo de riesgos: fugas, incendio y desperfectos de la calzada.
- En los domicilios no recogen cantidades inferiores a 10 litros de residuo.

3.2.2 Identificación de normatividad y trabajos previos en la Isla referente a biodiesel y aceites usados de cocina.

La Isla carece de legislación y control oficial sobre el manejo del aceite de cocina usado. No existen inspecciones ni verificaciones en los comercios de la calidad y reutilización de este residuo, ni para las empresas que lo reutilizan para la preparación de alimentos para animales. Tampoco hay controles, ni normas que regulen su recolección a nivel doméstico. En septiembre de 2003 la Oficina de Reciclaje de la Autoridad de Desperdicios Sólidos, con ayuda de la empresa Edelcar [53], intentó desarrollar un proyecto de recuperación de grasas y aceites usados de freír o cocinar, a nivel doméstico, a través de los Centros de Depósitos Comunitarios (93) de

la Isla, pero no obtuvo éxito. Los Centros de Depósito Comunitario o Drop-Off son las áreas designadas para que los ciudadanos de forma voluntaria y sin remuneración económica dispongan adecuadamente de los materiales reciclables tales como: vidrio, plástico, aluminio y papel periódico.

Los altos costos del proyecto hicieron casi imposible que se desarrollara, entre los cuales se encontraban los siguientes:

- Solicitar ante la ADS la modificación del permiso de operación, que tenía un costo de 80 dólares por cada “drop-off”, para poder incluir la recuperación del aceite de cocina usado.
- Compra de 2,500 a 4,000 recipientes para almacenar aceite de cocina usado en las residencias.
- Pautas de radio, pautas de prensa, compra de 78 pancartas o cruza calles para promocionar los diferentes centros de recolección de aceite de cocina.
- Costo por disposición de aceite de cocina usado contaminado.
- Compra de materiales absorbentes para contener derrames.
- Costo de personal extra en cada oficina de reciclaje durante las horas de servicio.
- Costo que la empresa Edelcar cobraba por recoger cada contenedor.

En el plan estratégico para el manejo de los residuos sólidos en Puerto Rico, [4] que fue publicado en agosto de 2004, se encuentran dos proyectos que hasta el momento no han sido desarrollados ni aplicados. En conversaciones con la señora Margarita Dihorse, dirección de residuos sólidos y con el señor José Estrella, director de la oficina de reciclado, no hay explicación para que hasta el momento no se haya trabajado en los siguientes dos proyectos:

“6.16.3. Reglamentar el manejo, almacenamiento y disposición de aceite de cocinar en restaurantes y cafeterías.

La ADS realizará un estudio abarcador que permita conocer la magnitud del problema de manejo y disposición de aceite de cocinar en restaurantes y cafeterías del país. A través del estudio se conocerán las alternativas que existen para solucionar este problema. También se conocerán los mecanismos utilizados en otros países para atender esta problemática. Esta acción conlleva la realización de un estudio económico que analice el problema y ofrezca recomendaciones para resolverlo. Como resultado del estudio, se someterá legislación para atender el problema”. El presupuesto del primer año de esta iniciativa es de \$27,000, el cual no ha sido asignado hasta el momento.

“6.16.4. Establecer programas de recuperación de aceite de cocinar.

El estudio económico que se realizará sobre la problemática del manejo y disposición de aceite de cocinar presentará alternativas para desarrollar un programa de recuperación de este producto. Los participantes en este proyecto serían: Junta de Calidad Ambiental (JCA), Autoridad de desperdicios Sólidos (ADS) y Autoridad de Acueducto y Alcantarillado (AAA)”. El presupuesto del primer año, tampoco asignado, es de \$243,000.

Uno de los pioneros y la persona más reconocida en la Isla por el tema del biodiesel es el Dr. José A. Colucci-Ríos del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, quien realizó un proyecto con un aporte del Departamento de Energía Federal y que tenía como objetivo de determinar la viabilidad técnica y económica de una industria de biodiesel en Puerto Rico.

El proyecto incluyó las siguientes tareas:

- Estudio de mercado de materias primas para la producción de biodiesel.
- Determinación de clientes potenciales para el biodiesel.
- Creación de un centro de excelencia que sirva como laboratorio y preste asesoría para la producción de biodiesel.
- Diseño de una planta piloto de biodiesel, de la cual fue responsable la empresa Panzardi.
- Identificación de industrias que podrían ser socios en el proyecto.
- Demostraciones del uso del biodiesel por toda la Isla. El contrato exigía cuatro demostraciones y en total se hicieron 25, con un total de 2,200 galones de biodiesel.

Los resultados obtenidos por el proyecto fueron los siguientes:

- Para el estudio de mercado de materias primas se concluyó que ésta representa entre el 60 y el 80 por ciento de los costos totales de una planta de biodiesel. Como se muestra en la Figura 3-2 el aceite de cocina usado y el que se puede recuperar de las trampas de grasas son la materia prima más económica para la fabricación del biodiesel.

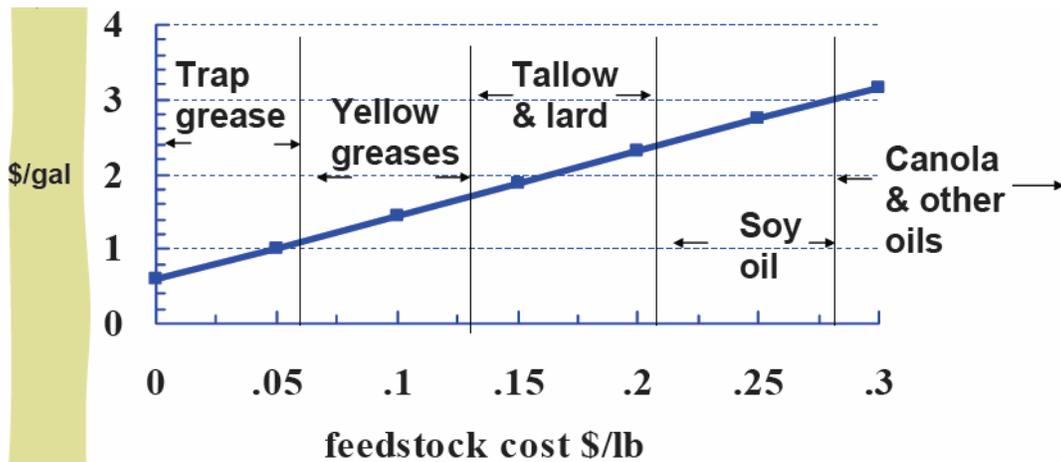


Figura 3-2. Costo de producción del biodiesel según MP utilizada.

- Referente a las materias primas es importante mencionar el programa de algas acuáticas del NREL (Laboratorio Nacional de Energías Renovables) dependiente del US DOE (Departamento de Energía de USA), que durante casi 20 años ha investigado el cultivo de algas (Spirulina Algae) productoras de lípidos (aceites y grasas) para generar biodiesel [34]. Han calculado que con solo 200,000 hectáreas desérticas, es decir con una pequeña porción de los desiertos disponibles en Estados Unidos, se podría producir todo el combustible necesario para el mayor consumidor mundial de energía. Estas algas pueden cultivarse en estanques con aguas provenientes de plantas depuradoras, en agua salada o en lugares desérticos. Su producción alcanza hasta 50.000 kilogramos por hectárea de aceite al año (entre 10 y 50 veces más de aceite por hectárea que cualquier otra materia prima), sin competir por terrenos ni agua de buena calidad. Pero este proyecto es poco viable porque tiene un alto costo de las instalaciones.

- El potencial de recolección de aceite de cocina usado y grasas animales varía entre 5 y 10 millones de galones por año en la Isla, de los cuales solo se recicla entre 1 a 1.5 millones de galones para la producción de alimento para animales. En la época que se realizó este estudio solo la empresa Edelcar lo reciclaba.
- Entran 20 millones de galones de aceite a la Isla, de los cuales 10 millones son para la preparación de papas fritas.
- En los mataderos existen 1 millón de galones de grasa animal que se puede reciclar.
- El consumo de diesel en Puerto Rico es de 679 (millones de) galones por año, los cuales están distribuidos de la siguiente forma: 3 galones en agricultura, 17 galones en el gobierno, 18 galones en servicios, 32 galones en construcción, 37 galones en manufactura (Calderas, y generadores de electricidad), 37 galones en transportación terrestre, 38 galones en cruceros, botes y barcos, 414 en la Autoridad de Energía Eléctrica y 21 galones en otros. Lo que se aclara que no suman los 679 mencionados anteriormente, sino solo 617.
- Hay aproximadamente 1,500 estaciones de servicio en toda la Isla, en promedio son 40,000 galones por estación. Si el gobierno legislara un 2% de biodiesel como en otros estados, esto representaría que el mercado de biodiesel en Puerto Rico sería de aproximadamente de 1.2 millones de galones por año de B100.

3.2.3 Determinar el potencial de aceite usado a recoger en Puerto Rico; importaciones de Diesel y de aceites vegetales y grasas animales a la Isla.

Para calcular los galones a reciclar se solicitó a la Junta de Planificación los datos de las importaciones a la Isla de petróleo y productos derivados y específicamente la de diesel (ver Anejo V) y las importaciones a Puerto Rico, de países extranjeros y de Estados Unidos, de grasas animales o vegetales y aceites (ver Anejo VI). Con esta información se calculó el total en kilogramos y en dólares de las importaciones a Puerto Rico de aceite vegetal y grasas animales. También se totalizó en barriles y en miles de dólares las importaciones de petróleo y productos derivados calculando el porcentaje, en barriles y en miles de dólares, de este total que corresponde al diesel, valor que varía por los cambios mensuales en los precios por barril. La Tabla 3-1 muestra un ejemplo de estos cálculos para el año fiscal de 2006, 2002 y 2001.

Tabla 3-1. Cálculos realizados para estimar galones a reciclar.

	2006	2002	2001
Total (Kg) importaciones a PR de aceites vegetales y grasas animales	91,771,300	92,211,131	87,612,840
Total (\$) importaciones a PR de aceites vegetales y grasas animales	\$ 103,885,594	\$ 68,348,818	\$ 85,118,821
Importación Total (Barriles) a PR de petróleo y productos derivados	74,697,604	67,884,491	80,665,761
Importación Total (Barriles) a PR de diesel	7,692,230	9,785,722	9,312,688
Porcentaje del diesel respecto al Total de importaciones de petróleo (Barriles)	10.3%	14.4%	11.5%
Importación Total (miles \$) a PR de petróleo y productos derivados	\$ 4,818,860	\$ 1,675,411	\$ 2,298,253
Importación Total (miles \$) a PR de diesel	\$ 597,839	\$ 267,437	\$ 324,413
Porcentaje del diesel respecto al Total de importaciones de petróleo (miles \$)	12.4%	16.0%	14.1%

Como la información de las importaciones de grasas y aceites vegetales se encuentra en kilogramos y la de petróleo y productos derivados en galones, fue necesario encontrar la masa del diesel para poder comparar estos dos datos. Un metro cúbico corresponde a 0.15898 barriles y la densidad del diesel a 90 °F (Calor) es 820 Kg/m³ y para 59 °F (Templado) es 845 Kg/m³. Utilizando estos datos se convirtieron los barriles de diesel a metros cúbicos y se calculó su masa. Con los datos en la misma unidad de masa, se encontró la relación del total de importaciones de grasas animales y aceites con respecto al total de masa del diesel para las dos densidades de acuerdo a la temperatura.

De este porcentaje calculado se determinó el 35 por ciento ya que se asumió una pérdida del 65 por ciento de aceite y grasas animales en el proceso de preparación de los alimentos. Con este último porcentaje se encuentra el valor en miles de dólares, barriles y galones de diesel que se hubiera podido reemplazar con biodiesel. La Tabla 3-2 muestra un ejemplo de los cálculos realizados para los años fiscales 2006, 2002 y 2001.

Tabla 3-2. Cálculos realizados para estimar los galones que se hubieran podido reciclar.

	2006	2002	2001	Densidad Diesel	
Volumen Diesel (m ³)	1,222,911	1,555,734	1,480,531		
Masa Diesel (Kg.) = Densidad * Volumen	1,002,786,795	1,275,701,949	1,214,035,533	820	90°F
	1,033,359,563	1,314,595,301	1,251,048,812	845	59°F
Relación de masa (Kg) de AV y GA respecto al Diesel	9.15%	7.23%	7.22%	820	90°F
	8.88%	7.01%	7.00%	845	59°F
% de AUC que se puede reciclar para la producción de Biodiesel, asumiendo una pérdida del 65%	3.20%	2.53%	2.53%	820	90°F
	3.11%	2.46%	2.45%	845	59°F
Calculo de Barriles de AV y GA	703,964	707,338	672,065	820	90°F
	683,137	686,411	652,182	845	59°F
Calculo de Galones de AV y GA	29,566,494	29,708,197	28,226,739	820	90°F
	28,691,746	28,829,256	27,391,628	845	59°F
Calculo de Barriles de AUC y GA que se hubieran podido reciclar para la producción de Biodiesel	246,387	247,568	235,223	820	90°F
	239,098	240,244	228,264	845	59°F
Calculo de Galones de AUC y GA que se hubieran podido reciclar para la producción de Biodiesel	10,348,273	10,397,869	9,879,359	820	90°F
	10,042,111	10,090,240	9,587,070	845	59°F

Concluyendo con este análisis que se hubiera podido reemplazar el diesel con biodiesel para los 6 años fiscales ya que el valor invertido fue de \$ 66.6 millones de dólares en la compra de petróleo y productos derivados, cantidad que la isla se hubiera podido ahorrar.

Como se puede ver en la Tabla 3-3, al tratar de hacer una validación con la información suministrada por la Junta de Planeación, el Departamento de Hacienda (ver Anejo VII) y los resultados obtenidos del proyecto de biodiesel en PR, se encontraron datos no coherentes entre si.

Tabla 3-3. Comparación de información suministrada por la Junta de Planificación – Departamento de Hacienda - Resultados del proyecto de biodiesel en PR.

	2006	2002	2001
Información Junta de Planificación			
Importación Total (Barriles) a PR de diesel (Junta de Planificación)	7,692,230	9,785,722	9,312,688
Importación Total (Galones) a PR de diesel (Junta de Planificación)	323,073,660	411,000,324	391,132,896
Información Departamento de Hacienda			
Ingreso de Arbitrios sobre productos del petróleo para Diesel (Departamento de Hacienda)	31,455,000	37,856,000	44,017,000
Arbitrio promedio por barril del petróleo crudo (Departamento de Hacienda)	3	4	4
Barriles (Departamento de Hacienda)	10,485,000	8,571,170	12,576,286
Galones (Departamento de Hacienda)	440,370,000	359,989,132	528,204,000
Información Resultados del Estudio de Biodiesel en PR			
Barriles (Resultados Estudio)		15,102,900	15,092,000
Galones (Resultados Estudio)		634,321,800	633,864,000

Para determinar el potencial de aceite de cocina usado a reciclar en los hogares de Puerto Rico se tomó el número total de hogares que es de 1,261,325. Esta información fue suministrada por el Censo del 2000 en el documento “Perfil demográfico de Puerto Rico - Censo 1990 - 2000” [35]. Se determinó que aproximadamente cada hogar genera un litro de aceite de cocina usado al

mes, equivalente a 15,135,900 litros por año, lo que corresponde a 3,998,482 galones por año. Esta cantidad representa un 40 por ciento del total a reciclar.

3.3 Determinación de los participantes en la cadena de recolección del aceite de cocina usado

3.3.1 Identificación de entidades a nivel gubernamental, industrial y universitario que intervienen en el tema del biodiesel y la recolección de aceites usados de cocina en Puerto Rico

Las entidades a nivel de gobierno que intervienen en la recolección del aceite de cocina usado y del biodiesel en Puerto Rico son las siguientes:

- Administración de Asuntos de Energía -Fuentes Renovables, Combustibles Alternos y Planificación
 - Junta de Calidad Ambiental (JCA),
 - Autoridad de desperdicios Sólidos (ADS)
 - Autoridad de Acueducto y Alcantarillado (AAA)
 - Departamento de Salud
 - Presidente de la Comisión de Recursos Naturales, Conservación y Medio Ambiente de la Cámara de Representantes, José Luis Rivera Guerra (PNP), representante por el distrito de Aguadilla y Moca, quien busca alternativas a los vertederos que tienen poco tiempo de vida útil. Se encuentra desarrollando un plan de reciclaje que permita postergar los años de uso de esas instalaciones.
- Participante en las estrategias mencionadas anteriormente para el Plan Estratégico del Manejo de los Residuos Sólidos

Las entidades a nivel industrial que intervienen en la recolección del aceite de cocina usado y del biodiesel en Puerto Rico se listan a continuación:

- Edelcar Inc., ubicada en el área industrial de Cataño, fue la primera empresa que inició la recolección de aceite de cocina usado en algunos restaurantes de la Isla, pero cobrando el servicio, con el objetivo de venderlo a las panaderías en República Dominicana para la elaboración del pan.
- Biodiesel de Puerto Rico inició operaciones, a principios del año 2007, en el área de Guaynabo, con una capacidad de producción de 1,600 galones diarios. Tres empresarios puertorriqueños iniciaron el proceso de recolección de aceite de cocina usado gratuitamente en algunos restaurantes de la Isla, para utilizarlo como materia prima para la producción de biodiesel. Algunos de los restaurantes que han entrado en el programa de reciclaje de aceite de cocina usado de la empresa son: McDonald's, Frito Lay's, Taco Maker, Denny's, Ponderosa, Mandy's BBQ entre otros. Sus principales clientes son Western Petroleum, JR Diesel, Hewlett Packard y J & J.

La compañía Machine, propiedad de uno de los socios, gratuitamente se encarga de recolectar el aceite usado por estos comercios para preparar el biodiesel. Viendo la falta de planificación que existe en su proceso de recolección y de la situación que también se presentan en la logística de transporte de la mayoría de las empresas en la Isla, surgió la idea de realizar este proyecto.

- Las empresas que recolectan las trampas de grasa en la Isla. fueron determinadas en una visita al edificio de agencias ambientales, el dos de febrero del 2007. En una conversación con el Señor Víctor Matta presidente de la división de permisos de

manejo de desperdicios no peligrosos, se determinaron los números de permisos de operación de la Junta de Calidad Ambiental, y con estos números se solicitaron los folios de cada una y se recogió la información que se muestra en la Tabla 3-4, más los datos de dirección, teléfono y contacto [53].

Tabla 3-4. Empresas que recolectan trampas de grasa.

Nombre	Pueblo	Galones Diarios	Grasa depositadas en
FCT Enviromental Vacum	Trujillo Alto	6,000 - 8,000	Sistema de Relleno Sanitario Peñuela Valley Land Fill (Waste Management) Sistema de Relleno Sanitario Ponce (BFI) Sistema de Relleno Sanitario Yauco (LM West Service Corp)
Eagle Support and Enviromental Service	Trujillo Alto	4 Camiones 12,000	Planta de tratamiento de la autoridad de acueducto y alcantarillado en Ponce(BFI) Waste Management Peñuela
E.R. Exterminating	Río Piedras	2 Camiones 1,000	Sistema de Relleno Sanitario Ponce (BFI)
Walcogroup, Corp	Trujillo Alto	2,500	Sistema de Relleno Sanitario Ponce (BFI) Sistema de Relleno Sanitario Peñuela Valley Land Fill (Waste Management)
AA Enviromental Service, Inc.	Carolina	400	Sistema de Relleno Sanitario Ponce (BFI) Planta de tratamiento de la autoridad de acueducto y alcantarillado en Puerto Nuevo
Grasas Sevilla, Inc.	Toa Baja	3,000	ADM Alliance Nutrition of PR Federación de Asociación Pecuaria El Verde Pourtry Farm Nutrimix Feed Co Inc Caribbean Pountry

Las entidades a nivel universitario que intervienen en la recolección del aceite de cocina usado y del biodiesel en Puerto Rico se listan a continuación:

- La Alianza Ciudadana Para la Educación en Energía Renovable (ACEER), como se encuentra en su página web, es una organización sin fines de lucro enfocada en la educación a la ciudadanía sobre los asuntos energéticos de Puerto Rico y del Planeta.

- Universidad de Puerto Rico, especialmente con el Dr. José A. Colucci-Ríos del Departamento de Ingeniería Química, Recinto Universitario de Mayagüez quien ha sido uno de los pioneros del biodiesel en la Isla. Otro profesor es el Dr. Abraham Ruiz García del Departamento de Física, Recinto Universitario de Humacao quien modificó un Mercedes 240D modelo 1982, rescatado de un Junker, para que funcionara con aceite de freír usado directamente.

3.3.2 Determinación de Fuentes de aceite usado y creación de base de datos.

Los principales puntos de emisión de aceite de cocina usado en la Isla provienen de las siguientes fuentes:

- “Fast Food”, restaurantes, cafeterías, freiduras, bares, puestos ambulantes, hoteles, casas de hospedaje y de ancianos, hospitales, colegios, universidades, cárceles, bases militares, empresas de “catering”, empresas de fritos.
- Hogares.
- Empresas que recogen trampas de grasas.
- Mataderos: Grasas animales (Sebo).
- Plantas de tratamiento de aguas.

Según el Caribbean Business Directory de 2006 [12], publicado por Casiano Communications Inc., en solo establecimientos de Fast Food existen 1,078 locales como se puede ver en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5. Sucursales de Fast Food en Puerto Rico.

Compañías de Fast Food	Franquicia	Sucursales
Caribbean Restaurants LLC	Burger King	167
Encanto Restaurants Inc.	Kentucky Fried Chicken	85
	Pizza Hut	52
	Taco Bell	31
Enigma Investment Inc.	Dominos Pizza	39
McDonald's Caribbean Region	McDonald's	112
South American Restaurants Corp.	Church's Chicken	91
	Pollo Tropical	19
Subway Island Development	Subway Restaurants	200
The Taco Maker Caribbean Operations	The Taco Maker	100
Wendco of Puerto Rico, Inc.	Wendy's	57
Intenational Restaurant Services, Inc	Chilli's Grill & Bar	14
	Romano's Macaroni Grill	3
BMJ Food P.R., Inc.	Ponderoza	29
	Bonanza	4
The Caribbean Investment Group, Corp.	Fuddruckers	4
	Uno Chicago Grill	7
Wometco de Puerto Rico, Inc.	Basking-Robbins	37
	Dunkin'Donuts	3
	B-R/DD Combo stores	13
MultiSystems Restaurants, Inc.	Sizzler	11
	Total de sucursales	1078

En una conversación telefónica con la Señora Rita Gotilla, directora de higiene y alimentos y secretaria auxiliar para salud ambiental del Departamento de Salud de Puerto Rico el 8 de febrero de 2007, existen en la Isla un total de 27,843 establecimientos como se puede ver en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6. Establecimientos en Puerto Rico según Departamento de Salud.

Establecimientos Departamento de Salud	
Restaurantes	5,194
Delicatésing	244
Cafeterías	5,044
Cafés	170
Freiduras	788
Puestos para la venta de carne cocida o asada	214
Refresquería	61
Puestos ambulantes	4,975
Barras	1,673
Establecimientos Mixtos	1,335
Establecimientos Temporeros	82
Escuelas	2,393
Hospitales	98
Centros de cuidado diurno	3,033
Organizaciones cívicas	97
Clubes privados	62
Iglesias	80
Casas de Hospedaje	196
Cárceles	55
Otros establecimientos en general	2,049
Total de Establecimientos	27,843

Según la Asociación de Restaurantes de Puerto Rico (Asore) [5] existen alrededor de 10,000 restaurantes en la Isla que generan aproximadamente 80,000 empleos. El personal de esta industria representa el 8% del sector laboral de Puerto Rico. En la página web de Asore se halla un directorio de todos los restaurantes, hoteles y catering que están afiliados a esta asociación. Para realizar una base de datos de estos y por la dificultad de que esta información fuera facilitada, se copió página por página en orden alfabético y se programó una macro para determinar el total de los restaurantes de la Isla, con su respectivo nombre, dirección, teléfono y pueblo, un total de 2,585 como se puede ver en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7. Base de Datos de los restaurantes de Puerto Rico

	NOMBRE DE LA FUENTE	DIRECCIÓN	PUEBLO	TELÉFONO
1	Star Light 1967	Carr 123 Km 32.6 Bo Saltillo	Adjuntas	787-829-0438
2	Restaurant Star Light	Carr 123 Km 32.5 Bo Saltillo	Adjuntas	787-829-1823
3	Gyros Cafe F B	36 Rodolfo Gonzalez	Adjuntas	787-829-2847
4	Restaurante Las Cabañas	Carr 123 Km 37.4 Bo Juan González	Adjuntas	787-829-3131
5	Rest Chinaton	1 Rodolfo González	Adjuntas	787-829-3776
6	Giomas en el Gigante	4-B Muñoz Rivera	Adjuntas	787-829-4444
7	Hideaway Restaurant	Carr 2 Km 135.6 Bo Naranjo	Aguada	787-252-0335
8	Taco Maker De Aguada	Carr 411 Km 0.2 Bo Guayabo	Aguada	787-252-0972
9	Cafeteria y Restaurant La Piedra	Carr 2 Km 139.3 Cerro Gordo	Aguada	787-252-1044
10	Rest El Gran Marnier	Carr 417 Km 5.4 Bo Las Marias	Aguada	787-252-1313

2579	Martin's BBQ	Yauco Plaza	Yauco	787-856-5551
2580	New China Express Restaurant	Centro Com'l Yauco Plaza	Yauco	787-856-6511
2581	Bobbys Bar And Grill	Carr 116 Bo susua Baja	Yauco	787-856-7332
2582	Gypsy Bar & Grill Inc	Carr 121 Km 13.3 Sect 4 Calle	Yauco	787-856-7800
2583	Churchs Chicken	18 25 de Julio	Yauco	787-856-8412
2584	Restaurant La Pagoda China	Carr 121 Km 13 Cuatro Calles	Yauco	787-856-8593
2585	Restaurant El Paladar	Yauco Shopping Center	Yauco	787-856-8947

Para mejorar la base de datos, esta información debe ser actualizada en un futuro con los otros datos, como se muestra en la herramienta para determinar las rutas de recolección del aceite de cocina usado.

3.4 Diseño del modelo que provee soluciones costo-efectivas para la recolección del aceite usado de cocina en la Isla de Puerto Rico

3.4.1 Desarrollo de herramienta que provee instrucciones a diario sobre los vehículos y rutas para recoger el aceite usado de cocina.

Al realizar las visitas a la planta de biodiesel, que utiliza el aceite usado de cocina como materia prima, y la empresa que recicla el aceite usado de motor, fue notorio el poco control que estas empresas tienen en sus rutas de recolección. Diariamente los que toman la decisión de determinar la ruta, son los conductores de los vehículos, y no existe un control en los costos de transporte ni un seguimiento de los clientes. Por tal motivo se identifica como área de oportunidad la creación de una base de datos y una herramienta que facilite la determinación de las rutas.

Para cumplir con el objetivo de minimizar los costos totales en el proceso de recolección de aceite de cocina usado, se creó una herramienta en Excel que permite determinar diariamente las rutas a seguir por cada uno de los vehículos de la planta. La herramienta determina el número de vehículos necesarios para recoger la cantidad de aceite disponible en las fuentes, también disminuye la distancia total recorrida al reducir el tiempo, de tal forma que se impactan muy favorablemente los costos de transporte. Las fuentes a visitar cada día son previamente determinadas de acuerdo a las llamadas que se reciban en la compañía por parte de las fuentes, comunicando que los contenedores de aceite están llenos. Como alternativa a las llamadas telefónicas se puede crear un formulario en la página web de la compañía, que será diligenciado por las fuentes con conexión a internet que ya tengan su contenedor lleno.

3.4.1.1 Flujograma de la Herramienta

3.4.1.1.1 Proceso manual de la herramienta

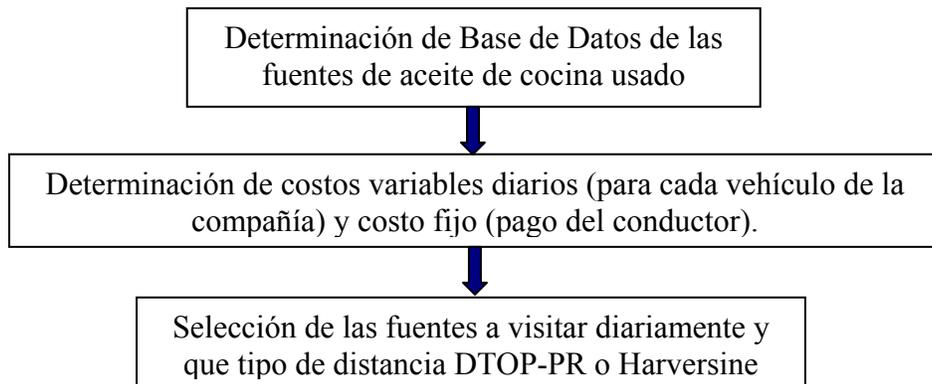
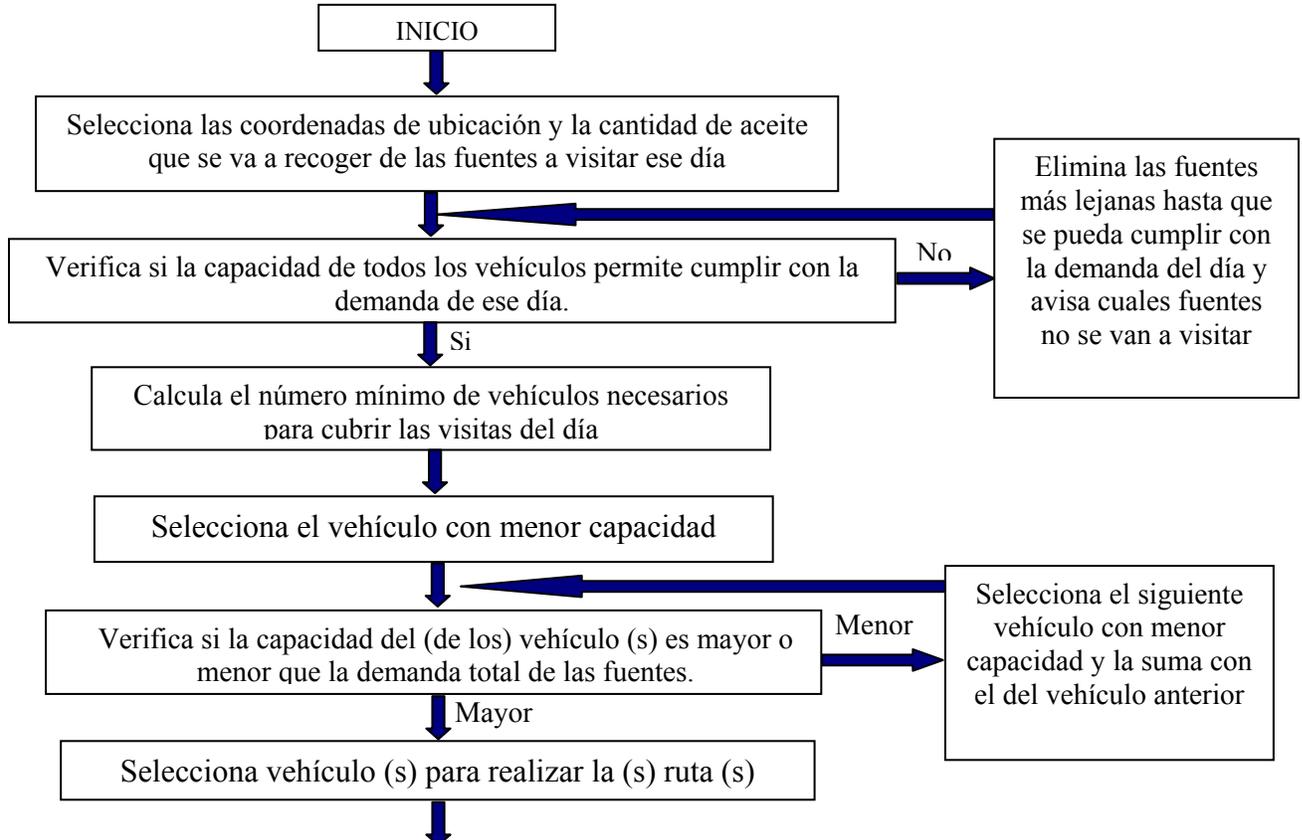


Figura 3-3. Diagrama de flujo del proceso manual de la herramienta

3.4.1.1.2 Lógica de la herramienta



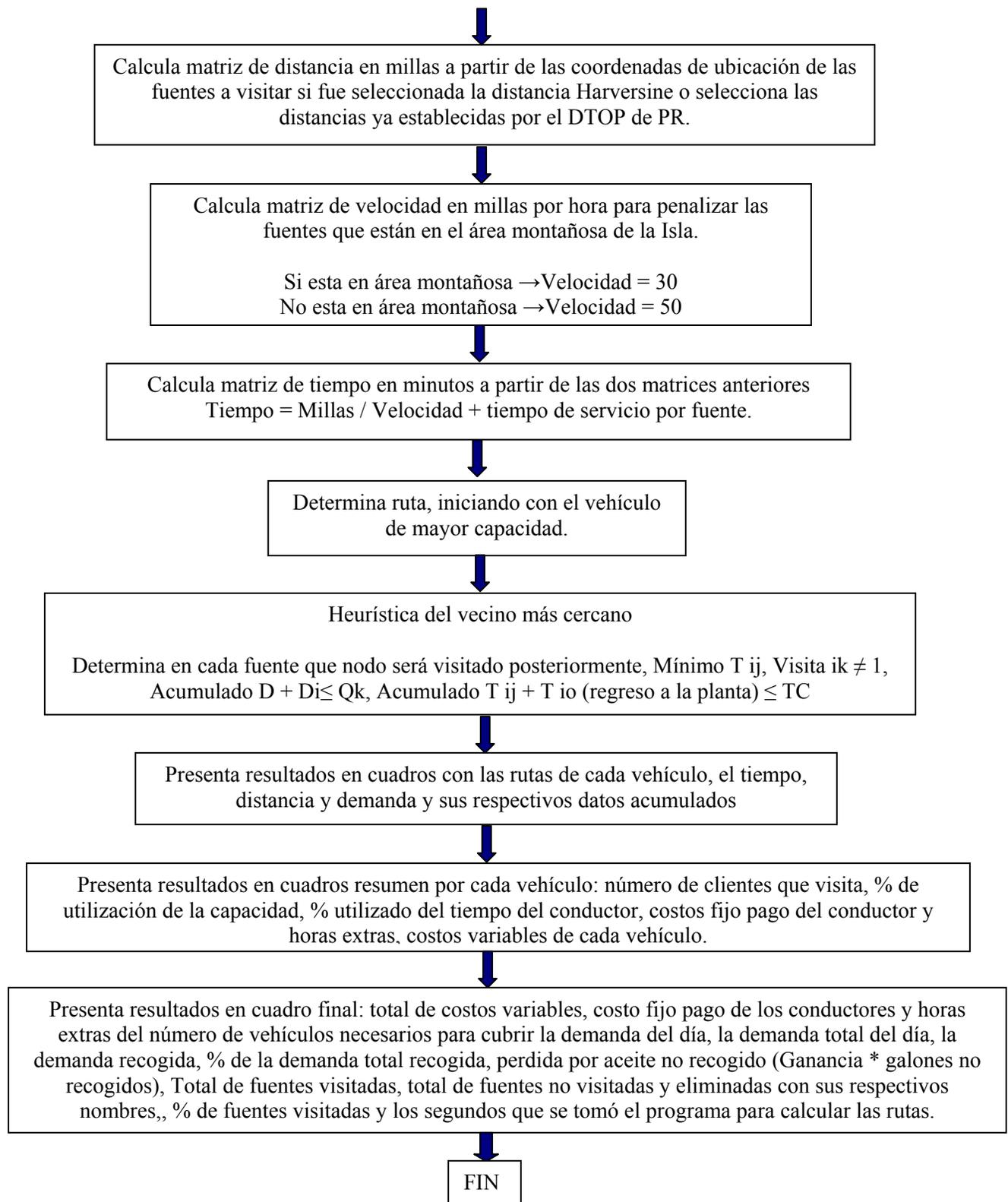


Figura 3-4. Diagrama de flujo de la lógica de la herramienta

3.4.1.2 Base de datos

Una base adecuada para cada uno de los clientes o fuentes contiene:

- Datos básicos de la fuente: franquicia, nombre, pueblo, número, teléfono, gerente o contacto, tipo de aceite.
- Coordenadas de ubicación: latitud y longitud, que se determinan a partir de la dirección en el programa Google Earth.
- Información del contenedor: fecha de entrega, referencia y la capacidad (Di) que es igual a la demanda o la cantidad de aceite usado que se va a recolectar en esa fuente.
- Datos que recoge el conductor en cada recorrido en la fuente: fecha de recolección, cantidad de galones recolectados y estado del aceite. En un futuro al tener suficiente información acumulada, se podrá determinar la frecuencia con que se deben realizar las visitas a cada uno de los clientes.

La Tabla 3-8 muestra un ejemplo de la base de datos que fue tomada como guía para desarrollar el programa.

Tabla 3-8. Base de datos de las Fuentes.

FRANQUICIA	NOMBRE DE LA FUENTE	PUEBLO	#	DIRECCIÓN	TELÉFONO
McDONALD'S	Aguadilla	Aguadilla	1	CARR. # 127 INT. PR # 2	787-787-5677
McDONALD'S	Arecibo	Arecibo	2	CARR. # 2 - # 117 BO. MAGINA	787-269-9730
McDONALD'S	Barranquitas	Barranquitas	3	CARR. # 152 - KM.12.4 BO.	787-279-1683
McDONALD'S	Cabo Rojo	Cabo Rojo	4	CARR. 411 KM.0.2 AVE. NATIVO ALERD BO.	787-835-7077
McDONALD'S	Caguas	Caguas	5	CARR. # 165 - RAMAL 185 KM10.8 BO.	787-856-6152
McDONALD'S	Canovanas	Canovanas	6	CARR. # 2 - KM 14.7	787-873-2245
McDONALD'S	Carolina	Carolina	7	CALLE MENDEZ VIGO CARR.#63 KM7.6	787-821-6797

LATITUD	LONGITUD	GERENTE / CONTACTO	TIPO DE ACEITE	INFORMACIÓN CONTENEDOR		
				FECHA DE ENTREGA	REFERENCIA	CAPACIDAD
18.429	-67.154	RAMON DELESTRE	Girasol	09/29/06	PK290224	300
18.474	-66.716	RAMON DELESTRE	Girasol	09/29/06	PK290244	300
18.189	-66.307	VICTOR CARDONA	Maiz	09/27/06	PK286488	500
18.089	-67.146	VICTOR CARDONA	Maiz	10/09/06	PK286499	100
18.236	-66.049	VICTOR CARDONA	Maiz	10/09/06	PK286502	300
18.381	-65.902	VICTOR CARDONA	Maiz	10/09/06	PK286137	200
18.3833	-65.95	MELVIN HERNANDEZ	Maiz	10/09/06	PK286506	400

3.4.1.3 Costos de transporte

Los vehículos de la planta de biodiesel (k), tienen diferentes capacidades (Q), por tal motivo fueron determinados los costos variables por cada vehículo (ver Anejo VIII). Los costos variables (CV_k) son el costo del combustible de biodiesel utilizados de acuerdo al millaje que realice cada vehículo en la ruta establecida por la herramienta, cambio de frenos, gomas, aceite, mangueras y limpieza del vehículo. También fue calculado el costo fijo del pago del conductor con el objetivo de poder realizar iteraciones agregando horas extras.

Los minutos disponibles por conductor (TC) se calculan al descontar el tiempo de almuerzo y al sumarle las horas extras del número total de horas trabajadas diariamente. La Tabla 3-9 muestra el cuadro resumen por cada vehículo.

Tabla 3-9. Cuadro resumen de los Vehículos.

CUADRO RESUMEN POR VEHICULO		VEHICULO 1	VEHICULO 2	VEHICULO 3	VEHICULO 4
Capacidad del vehiculo	Galones	2000	2500	3000	4000
Minutos disponibles por conductor	Minutos/Dia	420	420	420	420
Costos fijos conductor del vehiculo	Dólares/Dia	48	48	48	48
CF Horas Extras	Dólares/Dia	0	0	0	0
Costos variables del vehiculo	Dólares/Milla	0.22	0.22	0.28	0.31

La capacidad (Q_k) y el número de vehículos ($k = 1 \dots m$) pueden variar dependiendo de la disponibilidad de la flota, pero estos tienen que ser ordenados en la herramienta de tal forma que el Vehículo 1 sea el de menor capacidad y el Vehículo m sea el de mayor capacidad.

3.4.1.4 Explicación de la aplicación

En la barra de menú aparece MRAUC_PR (Modelo de Recolección de Aceite de cocina usado en Puerto Rico), al abrir este menú aparecen tres ítems como se puede observar en la Figura 3-5.

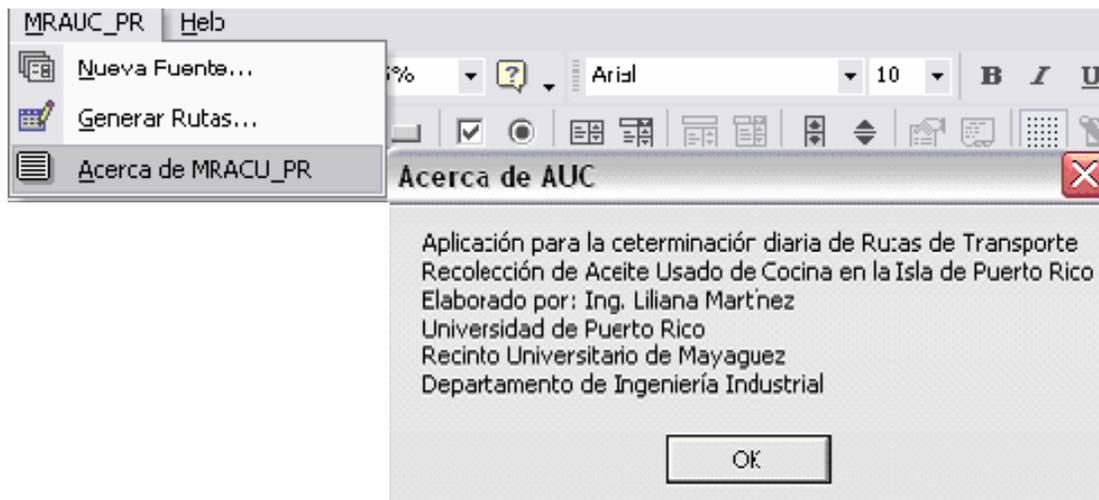
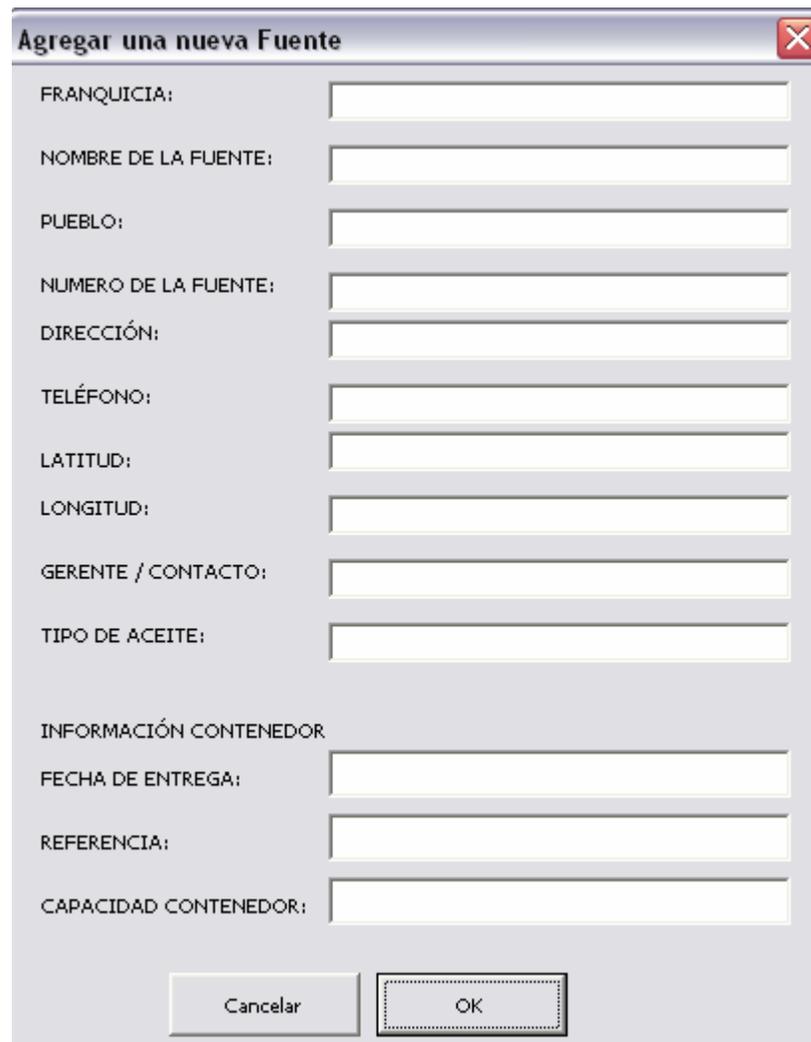


Figura 3-5. Menú MRAUC_PR

El primer ítem es Nueva Fuente, que al abrirlo, como se muestra a continuación en la Figura 3-6, activa la forma denominada Agregar una nueva Fuente. Esta permite adicionar a la

base de datos la información necesaria para una nueva fuente a visitar posteriormente, cuando su contenedor esté lleno.



El formulario 'Agregar una nueva Fuente' contiene los siguientes campos de texto:

- FRANQUICIA:
- NOMBRE DE LA FUENTE:
- PUEBLO:
- NUMERO DE LA FUENTE:
- DIRECCIÓN:
- TELÉFONO:
- LATITUD:
- LONGITUD:
- GERENTE / CONTACTO:
- TIPO DE ACEITE:
- INFORMACIÓN CONTENEDOR
 - FECHA DE ENTREGA:
 - REFERENCIA:
 - CAPACIDAD CONTENEDOR:

En la parte inferior del formulario se encuentran los botones 'Cancelar' y 'OK'.

Figura 3-6. Forma Agregar Nueva Fuente

El segundo ítem es Generar Rutas, que al abrirlo activa una segunda forma llamada Fuentes a Visitar, que se muestra a continuación en la Figura 3-7. En esta ventana se deben seleccionar las fuentes que en ese día se tienen que visitar (estas se seleccionan con la tecla Ctrl oprimida), también se indica que es la primera simulación y qué distancia se va a utilizar.

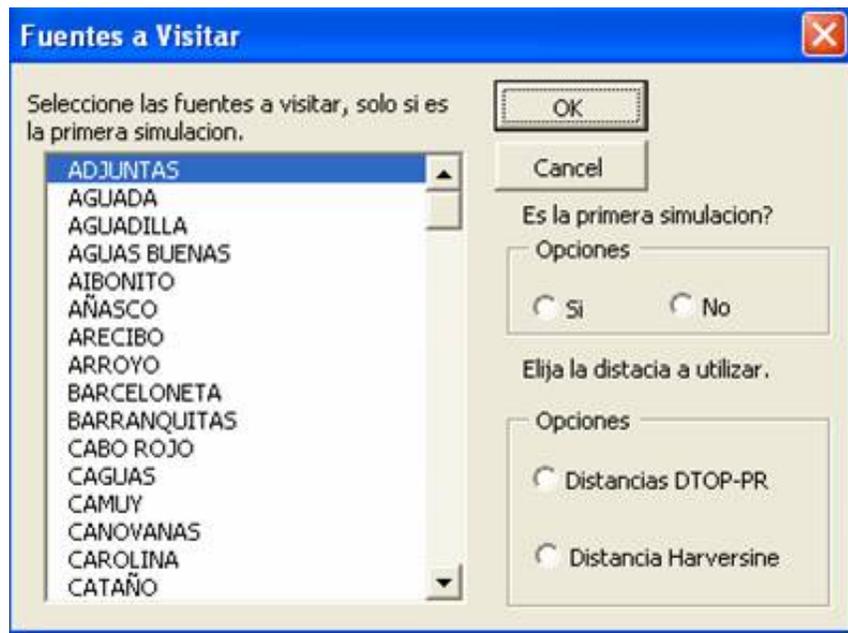


Figura 3-7. Forma Fuentes a Visitar

Para la primera simulación la herramienta desarrolla todo el proceso que se describe a continuación. En caso contrario no hay necesidad de seleccionar nuevamente las fuentes a visitar, ni el tipo de distancia, debido a que la herramienta utiliza las fuentes y las matrices de la primera iteración. El objetivo de realizar otras iteraciones es poder recoger el aceite de las fuentes que se quedan sin visitar, y esto se puede lograr agregando horas extras del conductor a los vehículos que la herramienta ha seleccionado como el número mínimo de vehículos necesarios para cumplir con la demanda del día. Este cambio se hace en las casillas en rojo de la hoja DATOSVEHICULOS y que se muestran en la Tabla 3-10.

Tabla 3-10. Cuadro para agregar horas extras.

COSTOS POR VEHÍCULO		VEHÍCULO 1	VEHÍCULO 2	VEHÍCULO 3	VEHÍCULO 4
Capacidad del vehículo	Galones	2,000	2,500	3,000	4,000
Velocidad del vehículo	Millas/Hora	50	50	50	50
Horas de turno del conductor	Horas/Día	8	8	8	8
Horas extras por turno del conductor	Horas/Día				
Hora de almuerzo del conductor	Hora/Día	1	1	1	1
Costo por hora del chofer	Dólares/Hora	6	6	6	6
CF Sueldo conductor por día	Dólares/Día	48	48	48	48

En caso que se necesiten muchas horas extras no es costo efectivo, y lo que hace la herramienta es agregar un vehículo en el cuadro resumen por vehículo ubicado en la hoja RUTAS-VEHICULOS del documento y que se muestra en la Tabla 3-11 y calcula el nuevo valor según las opciones que evalué.

Tabla 3-11. Cuadro para agregar un vehículo extra.

CUADRO RESUMEN POR VEHÍCULO		VEHÍCULO 4	VEHÍCULO 3
Capacidad del vehículo	Galones	4000	3000
Minutos disponibles por conductor	Minutos/Día	420	420
Costos fijos conductor del vehículo	Dólares/Día	48	48
CF Horas Extras	Dólares/Día	0	0
Costos variables del vehículo	Dólares/Milla	0.31	0.28

Los datos de cada iteración se van guardando en una hoja de trabajo indicando su número como se puede observar en la Figura 3-8.

DATOSVEHICULOS	RUTAS-VEHICULOS	RUTAS-VEHICULOS_2	RUTAS-VEHICULOS_1
----------------	-----------------	-------------------	-------------------

Figura 3-8. Nombre de hojas de trabajo por cada iteración.

Para la primera simulación, la herramienta automáticamente selecciona las coordenadas de ubicación de la fuente y la demanda (D_i) o cantidad de aceite de cocina usado a recoger del contenedor. Siempre selecciona como primer nodo la ubicación de la planta de donde salen los vehículos y le asigna una demanda igual a cero ($D_0 = 0$), como se muestra en la Tabla 3-12.

Tabla 3-12. Información de las fuentes a visitar por día.

Fuente	Latitud	Longitud	Capacidad Contenedor/ Demanda
Bayamón	18.4	-66.2	0
Aguadilla	18.429	-67.154	100
Aibonito	18.142	-66.265	100
Anasco	18.289	-67.14	150
Arecibo	18.474	-66.716	100
Arroyo	17.97	-66.062	200
Barranquitas	18.189	-66.307	200
Boqueron	18.026	-67.173	200
Cabo Rojo	18.089	-67.146	100
Caguas	18.236	-66.049	150
Canovanas	18.381	-65.902	200
Carolina	18.383	-65.95	100
Cayey	18.108	-66.164	200
Ceiba	18.266	-65.648	100
Ciales	18.336	-66.47	200
Comerio	18.222	-66.227	200
Condado	18.456	-66.071	200
Corozal	18.345	-66.317	200
Fajardo	18.333	-65.65	200
Guanica	17.975	-66.909	100
Guayama	17.979	-66.116	100
Guaynabo	18.367	-66.117	100
Gurabo	18.256	-65.973	200
Humacao	18.152	-65.828	100
Isabela	18.503	-67.025	100
Juana Díaz	18.05	-66.544	200
Juncos	18.226	-65.924	100
La Plata	18.156	-66.233	150
Lajas	18.046	-67.059	200
Las Marias	18.255	-66.986	100
Las Vegas	18.187	-67.033	150
Luquillo	18.377	-65.72	100
Manati	18.429	-66.493	150
Maunabo	18.009	-65.9	100
Mayagüez	18.203	-67.14	200
Moca	18.397	-67.114	100
Naguabo	18.216	-65.737	200
Naranjito	18.304	-66.244	100
Penuelas	18.062	-66.72	200
Ponce	18.013	-66.614	150
Río Grande	18.382	-65.832	150
Rio Piedras	18.4	-66.049	200
Salinas	17.979	-66.296	150
San German	18.077	-67.04	100

Con la sumatoria de las demandas de las fuentes a visitar y la sumatoria de las capacidades de los vehículos, el programa verifica primero que si se pueda visitar todas las fuentes con los vehículos disponibles $\sum_{i=1}^n Di \leq \sum_{k=1}^m Qk$. Si no se puede, entonces se activa un letrero como se muestra a continuación, indicando que la cantidad de aceite a recoger es mayor que la capacidad de los vehículos y que para poder cumplir con la demanda se tienen que eliminar las fuentes más lejanas a la planta.

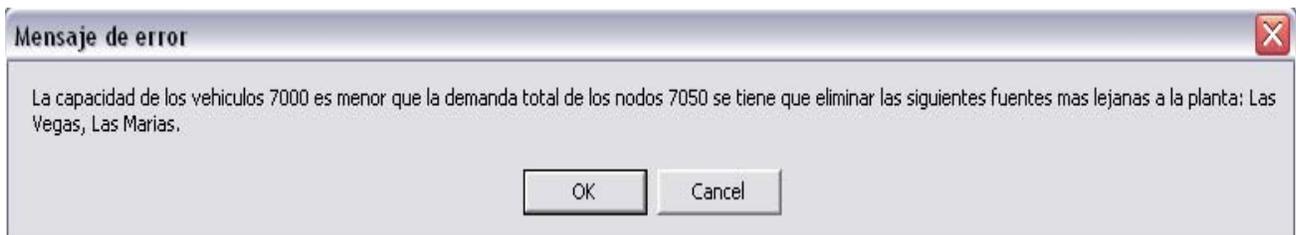


Figura 3-9. Mensaje de error demanda mayor a la capacidad de los vehículos

Al poder cumplir con la demanda, se calcula el número mínimo de vehículos necesarios para cubrir las visitas del día, como se muestra en la Figura 3-10. Primero se verifican los vehículos individualmente iniciando con el de menor capacidad, si no se puede cumplir las visitas diarias con un solo vehículo, comprueba parejas de vehículos empezando con los dos de menor capacidad. Si la suma de las capacidades de dos vehículos no cumple con la demanda de todas las fuentes empieza a verificar tríos iniciando con los tres vehículos de menor capacidad y así sucesivamente hasta que encuentre la cantidad mínima de vehículos con la que se puede cumplir con la demanda total del día. De esta manera se garantiza que solo se utilizan los vehículos necesarios y se incurre en costos ineludibles, para cumplir con las visitas diarias.

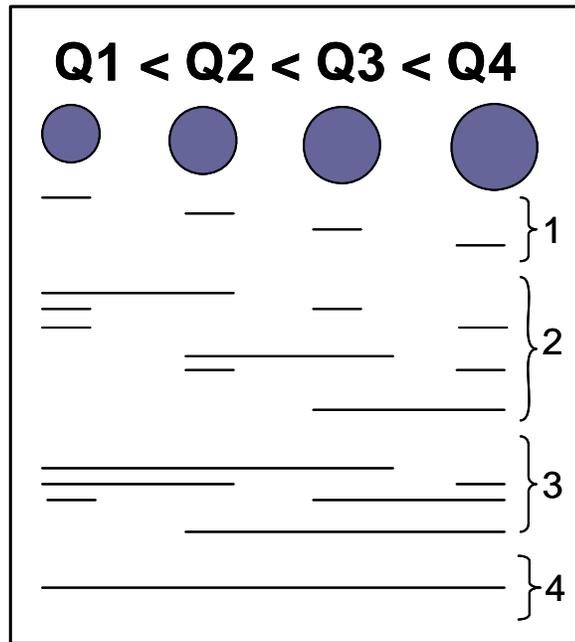


Figura 3-10. Determinación de número mínimo de vehículos

Cuando el número mínimo de vehículos necesarios es menor que el número de vehículos disponibles diariamente, la herramienta realizará iteraciones adicionales, agregando uno por uno los vehículos extras para determinar cual es la opción más económica.

Posteriormente, al seleccionar el vehículo que va a realizar la primera ruta, selecciona el de mayor capacidad, para poder cubrir el mayor número de clientes. Con una restricción adicional verifica que este vehículo más pesado no visite ningún nodo que este en el área montañosa. A partir de la información de las fuentes a visitar y de las zonas montañosas de la Isla, el programa calcula automáticamente tres matrices. La primera es la matriz de distancias ($Dist_{ij}$) que calcula en millas el recorrido entre todas las fuentes como se muestra en la Figura 3-11. La herramienta cuenta con dos formas de calcular esta matriz de distancia, la primera es a partir de la matriz de distancia preestablecida por el Departamento de Transporte y Obras Públicas de Puerto Rico [19].

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
1	Matriz de Distancias																							
2	44	Bayamón	Aguadilla	Aibonito	Anasao	Arecibo	Arroyo	Barranquitas	Boqueron	Cabo Rojo	Caguas	Canovanas	Carolina	Cayey	Ceiba	Ciales	Comerio	Condado	Corozal	Fajardo	Guanica	Guayama	Guaynabo	Gurabo
3	Bayamón		65.85	19.36	65.38	37.45	30.27	17.85	71.94	68.80	13.13	16.31	13.16	20.20	34.20	21.44	13.30	6.46	11.59	33.11	57.83	29.17	3.17	15.29
4	Aguadilla	65.85		61.60	9.72	28.87	78.38	57.98	27.87	23.50	73.69	82.15	79.00	68.64	99.40	45.31	62.46	71.01	55.18	98.84	35.25	74.89	68.14	78.37
5	Aibonito	19.36	61.60		58.32	37.44	17.86	4.26	60.17	57.97	15.60	28.98	26.55	7.04	41.39	18.99	6.06	25.15	14.44	42.47	43.85	14.92	18.32	20.72
6	Anasao	65.38	9.72	58.32		30.60	74.14	55.10	18.30	13.82	71.68	81.44	78.32	65.27	97.90	44.07	60.09	71.04	54.12	97.78	26.47	70.57	67.33	76.60
7	Arecibo	37.45	28.87	37.44	30.60		55.27	33.28	43.10	38.77	46.73	53.74	50.60	44.17	71.49	18.74	36.49	42.29	27.63	70.56	36.73	52.16	39.98	51.00
8	Arroyo	30.27	78.38	17.86	74.14	55.27		22.09	73.11	71.69	18.40	30.28	29.49	11.65	34.02	36.84	20.51	33.58	30.85	36.90	55.67	3.60	27.64	20.61
9	Barranquitas	17.85	57.98	4.26	55.10	33.28	22.09		57.98	55.52	17.24	29.70	27.00	10.93	43.57	14.75	5.72	24.08	10.80	44.25	42.21	19.18	17.51	22.40
10	Boqueron	71.94	27.87	60.17	18.30	43.10	73.11	57.98		4.70	75.22	86.95	83.98	66.52	101.49	50.88	63.58	78.18	60.36	102.21	17.70	69.53	73.22	80.38
11	Cabo Rojo	68.80	23.50	57.97	13.82	38.77	71.69	55.52	4.70		72.73	84.09	81.08	64.51	99.09	47.54	61.03	74.95	57.21	99.63	17.45	68.10	70.22	77.86
12	Caguas	13.13	73.69	15.60	71.68	46.73	18.40	17.24	75.22	72.73		13.91	12.07	11.63	26.39	28.47	11.72	15.27	19.13	27.03	59.29	18.29	10.06	5.17
13	Canovanas	16.31	82.15	28.98	81.44	53.74	30.28	29.70	86.95	84.09	13.91		3.15	25.52	18.46	37.38	23.98	12.23	27.33	16.85	71.81	31.13	14.11	9.81
14	Carolina	13.16	79.00	26.55	78.32	50.60	29.49	27.00	83.98	81.08	12.07	3.15		23.64	21.40	34.26	21.92	9.39	24.21	19.97	68.98	29.98	10.99	8.92
15	Cayey	20.20	68.64	7.04	65.27	44.17	11.65	10.93	66.52	64.51	11.63	25.52	23.64		35.59	25.52	8.90	24.81	19.21	37.15	49.80	9.45	18.14	16.18
16	Ceiba	34.20	99.40	41.39	97.90	71.49	34.02	43.57	101.49	99.09	26.39	18.46	21.40	35.59		54.14	38.12	30.69	44.22	4.65	85.21	36.57	31.52	21.34
17	Ciales	21.44	45.31	18.99	44.07	18.74	36.84	14.75	50.88	47.54	28.47	37.38	34.26	25.52	54.14		17.78	27.44	10.05	53.78	38.12	33.89	23.27	33.07
18	Comerio	13.30	62.46	6.06	60.09	36.49	20.51	5.72	63.58	61.03	11.72	23.98	21.32	8.90	38.12	17.78		19.13	10.35	38.63	47.93	18.30	12.34	16.83
19	Condado	6.46	71.01	25.15	71.04	42.29	33.58	24.08	78.18	74.95	15.27	12.23	9.39	24.81	30.69	27.44	19.13		17.86	43.75	46.52	28.52	13.22	23.39
20	Corozal	11.59	55.18	14.44	54.12	27.63	30.85	10.80	60.36	57.21	19.13	27.33	24.21	19.21	44.22	10.05	10.35	17.86		43.75	46.52	28.52	13.22	23.39
21	Fajardo	33.11	98.84	42.47	97.78	70.56	36.90	44.25	102.21	99.63	27.03	16.85	19.97	37.15	4.65	53.78	38.63	28.87	43.75		86.29	39.18	30.69	21.85
22	Guanica	57.83	35.25	43.85	26.47	36.73	55.67	42.21	17.70	17.45	59.29	71.81	68.98	49.80	85.21	38.12	47.93	64.26	46.52	86.29		52.12	58.63	64.46
23	Guayama	29.17	74.89	14.92	70.57	52.16	3.60	19.18	69.53	68.10	18.29	31.13	29.98	9.45	36.57	33.89	18.30	33.09	28.52	39.18	52.12		26.79	21.32
24	Guaynabo	3.17	68.14	18.32	67.33	39.98	27.64	17.51	73.22	70.22	10.06	14.11	10.99	18.14	31.52	23.27	12.34	6.96	13.22	30.69	58.63	26.79		12.14
25	Gurabo	15.29	78.37	20.72	76.60	51.00	20.61	22.40	80.38	77.86	5.17	9.81	8.92	16.18	21.34	33.07	16.83	15.24	23.39	21.85	64.46	21.32	12.14	
26	Humacao	27.20	89.07	28.70	86.62	62.35	19.86	31.55	88.77	86.66	15.62	16.55	17.87	22.27	14.20	44.00	26.63	26.37	34.75	17.13	72.05	22.38	24.06	11.93
27	Isabela	57.79	9.88	55.74	16.60	20.35	73.14	51.84	34.36	29.69	66.60	74.09	70.94	62.73	91.76	38.17	55.81	62.60	47.68	90.90	37.27	69.78	60.28	71.06
28	Juana Díaz	35.40	47.83	19.39	42.47	31.39	32.15	18.29	41.36	39.63	34.95	47.94	45.28	25.28	60.69	20.35	23.97	41.84	25.25	61.86	24.54	28.55	35.57	40.10
29	Juncos	19.09	81.88	23.12	79.91	54.69	19.87	25.27	83.17	80.78	8.23	10.81	11.00	17.74	18.32	36.62	19.89	18.59	27.06	19.44	66.97	21.22	15.95	3.83
30	La Plata	17.72	63.29	2.31	60.23	38.55	17.07	5.37	62.39	60.13	13.28	26.71	24.32	5.61	39.14	19.91	4.58	23.29	14.17	40.17	46.13	14.44	16.44	18.41
31	Lajas	64.48	27.19	52.57	17.61	37.16	65.72	50.36	7.62	6.44	67.60	79.38	76.42	58.94	93.88	43.55	55.97	70.75	52.90	94.59	11.01	62.13	65.70	72.76
32	Las Marias	55.74	16.31	47.96	10.37	23.29	63.79	44.79	20.03	15.55	61.50	71.63	68.53	54.91	87.79	34.31	49.86	61.59	44.32	87.81	20.00	60.23	57.54	66.47
33	Las Vegas	59.74	18.50	50.49	9.95	28.70	65.50	47.63	14.46	10.08	64.65	75.37	72.31	57.30	91.03	38.32	52.93	65.75	48.20	91.28	16.77	61.90	61.36	69.71
34	Luquillo	28.24	94.08	39.27	93.33	65.63	35.98	40.64	98.40	95.67	23.68	11.94	15.09	34.56	9.01	49.26	34.94	23.65	39.21	5.49	82.85	37.84	26.02	18.58
35	Manatí	22.57	43.33	24.84	43.52	14.94	42.50	20.59	52.60	48.86	32.03	38.89	35.74	30.95	56.55	6.60	22.56	27.72	12.92	55.67	41.59	39.74	25.04	36.14
36	Maunabo	31.61	87.27	25.68	83.68	62.45	10.98	29.48	83.65	82.04	18.49	25.70	26.07	18.64	24.27	43.71	26.03	32.86	35.89	27.77	66.35	14.34	28.52	17.73
37	Mayagüez	66.35	15.64	57.60	5.94	33.52	72.61	54.69	12.42	7.89	71.64	82.14	79.05	64.41	98.01	44.91	59.94	72.26	54.88	98.17	21.87	69.01	68.08	76.67
38	Moca	63.20	3.43	58.42	7.65	26.62	75.09	54.86	25.92	21.38	70.74	79.47	76.32	65.46	96.58	42.44	59.43	68.49	52.38	96.10	32.11	71.59	65.42	75.47
39	Naguabo	29.93	94.10	35.04	92.20	66.63	27.29	37.46	95.21	92.92	20.52	15.72	18.13	29.01	6.79	48.80	32.16	27.47	39.08	9.91	78.75	29.79	27.00	15.73
40	Naranjito	9.06	60.29	11.28	58.79	33.10	25.99	8.96	63.94	61.04	13.63	23.05	20.04	14.52	39.19	14.99	5.77	15.46	5.56	39.01	49.23	23.98	9.41	18.09
41	Penuelas	44.10	38.13	30.39	31.72	28.47	43.70	28.50	29.86	28.04	45.67	58.03	55.19	36.66	71.77	25.05	34.21	50.54	32.89	72.69	13.80	40.10	44.84	50.84
42	Ponce	40.53	45.83	24.60	39.45	32.55	36.40	23.55	36.74	35.34	40.17	53.20	50.54	30.28	65.79	24.24	29.23	46.97	30.10	67.04	19.56	32.81	40.78	45.31
43	Río Grande	20.89	86.73	32.90	86.03	58.29	32.22	33.90	91.39	88.57	17.45	4.59	7.74	28.86	14.49	41.96	28.17	16.48	31.91	12.40	76.09	33.51	18.70	12.70

Figura 3-11. Matriz de Distancia

La segunda forma que utiliza la herramienta es calculando la distancia entre dos puntos en el plano cartesiano. Existen diferentes formas de calcular esta distancia, la utilizada en esta herramienta es la formula Harversine [25], la cual asume que la forma de la tierra es esférica y calcula la distancia mínima entre dos puntos de la superficie terrestre, utilizando como variables la longitud y latitud.

Las formulas utilizadas son las siguientes:

- Latitud y Longitud tiene que estar en radianes. $\text{Radianes} = p * \text{grados}/180$
- $\Delta\text{Latitud} = \text{latitud}_2 - \text{latitud}_1$
- $\Delta\text{Longitud} = \text{longitud}_2 - \text{longitud}_1$
- $a = \text{Seno}^2(\Delta\text{Latitud}/2) + \text{Coseno}(\text{latitud}_1) * \text{Coseno}(\text{latitud}_2) * \text{Seno}^2(\Delta\text{Longitud}/2)$
- $c = 2 * \text{Arcotangente}^2(\sqrt{(1-a)}, \sqrt{a})$
- $D_{ij} = R * c$ $R = \text{radio de la tierra} = 6,371\text{km}$

La Figura 3-12 muestra la opción que presenta la herramienta para seleccionar el tipo de distancia que se quiere utilizar, esta aparece en la forma fuentes a visitar al seleccionar en el menú la opción generar rutas.

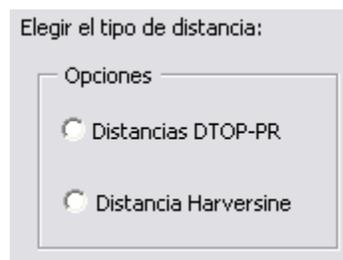


Figura 3-12. Opciones tipo de distancia

La segunda matriz es la de velocidad (Vel_{ij}) en millas por hora, en la que se penaliza las fuentes que se encuentran ubicadas en las zonas montañosas de la Isla, para que los vehículos con mayor capacidad y con mayor peso, no visiten estos nodos. Para determinar qué zonas de la Isla tienen vías de acceso en las que la velocidad tiene que ser menor, se diagramaron estas zonas en un mapa y se determinaron sus coordenadas. Con la latitud y longitud de cada fuente se determina si ese punto se encuentra o no dentro de alguna de estas cuatro zonas, si está dentro se asigna una velocidad de 30 millas por hora, por ser zona montañosa, de lo contrario se le asigna una velocidad de 50 millas por hora.

A continuación se presenta el mapa de la Isla (Figura 3-13) con las zonas montañosas, y su respectiva tabla de coordenadas (Tabla 3-13).



Figura 3-13. Mapa de las zonas montañosas de Puerto Rico

Tabla 3-13. Coordenadas de las zonas montañosas de Puerto Rico.

Zona 1		Zona 2		Zona 3		Zona 4	
Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud
18.41767	-66.7389	18.41889	-66.688	18.03342	-66.1383	18.36325	-65.7414
18.37454	-66.707	18.39098	-66.5958	18.0741	-66.1488	18.34908	-65.7783
18.32194	-66.6978	18.38523	-66.4839	18.12058	-66.0581	18.35031	-65.8584
18.28624	-66.72	18.38723	-66.413	18.18199	-66.0071	18.34879	-65.9334
18.25136	-66.7403	18.33724	-66.2723	18.19528	-65.934	18.30902	-66.0047
18.20923	-66.7417	18.30883	-66.1399	18.14811	-65.8992	18.34879	-65.9334
18.16844	-66.7444	18.25377	-66.0719	18.0972	-65.8696	18.30902	-66.0047
18.12924	-66.7075	18.17236	-66.1206	18.04685	-65.9207	18.27214	-65.9902
18.08206	-66.6594	18.10812	-66.2032	18.02292	-65.982	18.26357	-65.9401
18.07234	-66.7041	18.03646	-66.2815	18.01686	-66.0581	18.24054	-65.8871
18.06038	-66.8279	18.07722	-66.4008	18.03342	-66.1383	18.18838	-65.842
18.05561	-66.9062	18.07223	-66.5152	Y	X	18.21149	-65.8054
18.09136	-66.9552	18.06655	-66.6002			18.22894	-65.7426
18.13209	-67.0561	18.13457	-66.6316			18.24334	-65.6798
18.18531	-67.0947	18.17735	-66.688			18.28426	-65.6698
18.25812	-67.1227	18.24692	-66.6927			18.30574	-65.6664
18.32087	-67.1171	18.32948	-66.659			18.33602	-65.6946
18.41732	-67.0773	18.37791	-66.6606			18.36325	-65.7414
18.4372	-67.0015	18.41889	-66.688			Y	X
18.4383	-66.8761	Y	X				
18.41767	-66.7389						
Y	X						

Como se puede ver en el mapa de la Isla cada zona montañosa con diferente color representa un polígono y para determinar si la fuente está o no está en alguna de estas cuatro zonas, se utiliza el siguiente teorema [10]: “Toda línea poligonal cerrada C divide el plano en dos regiones, una acotada y la otra no. Además, se puede determinar si un punto p está en la región acotada contando el número de veces que cualquier semirrecta que comienza en q atraviesa a C; q estará en dicha región si y sólo si dicho número es impar”.

Como se puede ver en la Figura 3-14 se traza una línea recta hacia la derecha del punto o fuente y se contabiliza cuantas veces cruza algún borde de los polígonos. Si el número de veces es par, la fuente no está dentro de ningún polígono y si el número es impar, el nodo está ubicado en una de las zonas montañosas de la Isla; por lo tanto se le asigna una penalidad con una velocidad de 30 millas por hora. Cuando se asigna la ruta al vehículo más pesado se verifica que el nodo actual y el nodo próximo no tengan velocidad de 30.

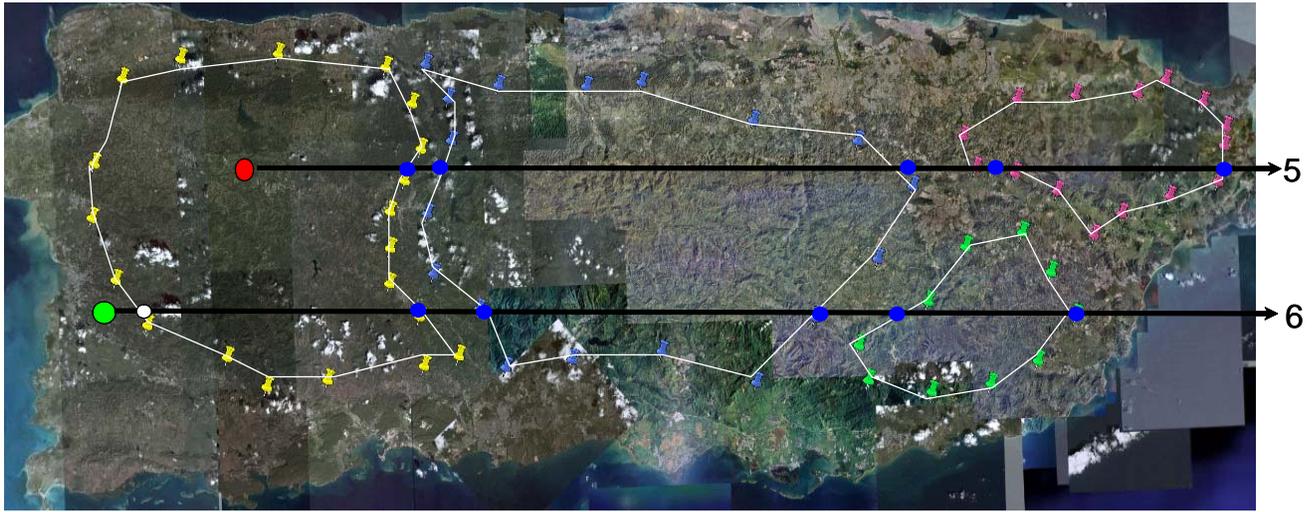


Figura 3-14. Determinar si un punto esta o no dentro de un polígono.

La tercera matriz es la de tiempo en minutos ($T_{ij} = \text{Dist}_{ij} / \text{Vel}_{ij} + \text{TS}$), que es calculada a partir de las dos matrices anteriores (matriz de distancia dividida matriz de velocidad). A cada tiempo calculado por nodo se le suma un tiempo aproximado de servicio por cada una de las fuentes de 20 minutos (TS), mientras el conductor recoge el aceite del contenedor y recopila la información para la base de datos.

A continuación se presentan la matriz de velocidades en la Figura 3-15 y la matriz de tiempos en la Figura 3-16 que son determinadas por el programa.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
1	Matriz de Velocidades																							
2		Bayamón	Aguadilla	Aibonito	Anasco	Arecibo	Arroyo	Barranquitas	Boqueron	Cabo Rojo	Caguas	Canovanas	Carolina	Cayey	Ceiba	Ciales	Comerio	Condado	Corozal	Fajardo	Guanica	Guayama	Guaynabo	Gurabo
3	Bayamón		50	30	50	50	50	30	50	50	50	50	50	50	50	30	30	50	30	50	50	50	50	50
4	Aguadilla	50		30	50	50	50	30	50	50	50	50	50	50	50	30	30	50	30	50	50	50	50	50
5	Aibonito	30	30		50	50	50	30	50	50	50	50	50	50	50	30	30	50	30	50	50	50	50	50
6	Anasco	50	50	50		50	50	30	50	50	50	50	50	50	50	30	30	50	30	50	50	50	50	50
7	Arecibo	50	50	50	50		50	30	50	50	50	50	50	50	50	30	30	50	30	50	50	50	50	50
8	Arroyo	50	50	50	50	50		30	50	50	50	50	50	50	50	30	30	50	30	50	50	50	50	50
9	Barranquitas	30	30	30	30	30	30		50	50	50	50	50	50	50	30	30	50	30	50	50	50	50	50
10	Boqueron	50	50	50	50	50	50	50		50	50	50	50	50	50	30	30	50	30	50	50	50	50	50
11	Cabo Rojo	50	50	50	50	50	50	50	50		50	50	50	50	50	30	30	50	30	50	50	50	50	50
12	Caguas	50	50	50	50	50	50	50	50	50		50	50	50	50	30	30	50	30	50	50	50	50	50
13	Canovanas	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50		50	50	50	30	30	50	30	50	50	50	50	50
14	Carolina	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50		50	50	30	30	50	30	50	50	50	50	50
15	Cayey	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50		50	30	30	50	30	50	50	50	50	50
16	Ceiba	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50		30	30	50	30	50	50	50	50	50
17	Ciales	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30		30	50	30	50	50	50	50	50
18	Comerio	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30		50	30	50	50	50	50	50
19	Condado	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50		30	50	50	50	50	50
20	Corozal	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30		50	50	50	50	50
21	Fajardo	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50		50	50	50	50
22	Guanica	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50		50	50	50
23	Guayama	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50		50	50
24	Guaynabo	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50		50
25	Gurabo	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
26	Humacao	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
27	Isabela	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
28	Juana Díaz	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
29	Juncos	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
30	La Plata	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
31	Lajas	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
32	Las Marias	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
33	Las Vegas	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
34	Luquillo	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
35	Manati	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
36	Maunabo	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
37	Mayagüez	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
38	Moca	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
39	Naguabo	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
40	Naranjito	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
41	Penuelas	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
42	Ponce	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
43	Río Grande	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

Figura 3-15. Matriz de Velocidad

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z		
1	Matriz de Tiempos																											
2	20	Bayamón	Aguadilla	Aibonito	Anasco	Arecibo	Arroyo	Barranqu	Boquero	Cabo Ro	Caguas	Canovan	Carolina	Cajey	Ceiba	Ciales	Comerio	Condadc	Corozal	Fajardo	Guanica	Guayama	Guaynab	Gurabo	Humaca	Isabela		
3	Bayamón		99.02	58.71	98.45	64.94	56.32	55.70	106.33	102.56	35.75	39.58	35.80	44.24	61.04	62.89	46.59	27.76	43.18	59.73	89.40	55.01	23.81	38.35	52.64	89.35		
4	Aguadilla	99.02		143.20	31.66	54.65	114.05	135.96	53.45	48.20	108.43	118.58	114.79	102.36	139.29	110.61	144.92	105.21	130.37	138.60	62.30	109.87	101.77	114.04	126.88	31.86		
5	Aibonito	58.71	143.20		89.98	64.92	41.43	28.52	92.21	89.56	38.71	54.78	51.87	28.44	69.67	57.98	32.13	50.18	48.87	70.96	72.62	37.91	41.99	44.87	54.44	86.89		
6	Anasco	98.45	31.66	89.98		56.72	108.96	130.20	41.96	36.59	106.01	117.73	113.98	98.33	137.48	108.14	140.17	105.25	128.24	137.34	51.77	104.68	100.80	111.92	123.95	39.92		
7	Arecibo	64.94	54.65	64.92	56.72		86.32	86.55	71.72	66.53	76.08	84.49	80.72	73.00	105.79	57.47	92.98	70.75	75.27	104.67	64.08	82.59	67.98	81.20	94.82	44.42		
8	Arroyo	56.32	114.05	41.43	108.96	86.32		64.18	107.73	106.03	42.08	56.33	55.39	33.98	60.82	93.68	61.02	60.30	81.70	64.28	86.80	24.32	53.17	44.73	43.83	107.77		
9	Barranqu	55.70	135.96	28.52	130.20	86.55	64.18		89.57	86.62	40.69	55.64	52.39	33.12	72.29	49.50	31.45	48.90	41.60	73.10	70.66	43.02	41.01	46.88	57.86	82.21		
10	Boquero	106.33	53.45	92.21	41.96	71.72	107.73	89.57		25.64	110.26	124.34	120.78	99.82	141.79	121.75	147.16	113.82	140.72	142.65	41.24	103.44	107.86	116.45	126.52	61.23		
11	Cabo Ro	102.56	48.20	89.56	36.59	66.53	106.03	86.62	25.64		107.28	120.91	117.29	97.41	138.91	115.07	142.06	109.94	134.42	139.55	40.94	101.71	104.27	113.44	123.99	55.62		
12	Caguas	35.75	108.43	38.71	106.01	76.08	42.08	40.69	110.26	107.28		36.69	34.49	33.95	51.67	76.94	43.44	38.32	58.25	52.43	91.14	41.95	32.08	26.21	38.75	99.93		
13	Canovan	39.58	118.58	54.78	117.73	84.49	56.33	55.64	124.34	120.91	36.69		23.78	23.78	50.63	42.15	94.75	67.97	34.68	74.65	40.22	106.17	36.94	31.77	39.86	108.91		
14	Carolina	35.80	114.79	51.87	113.98	80.72	55.39	52.39	120.78	117.29	34.49	23.78		48.37	45.68	88.51	62.63	31.27	68.42	43.97	102.78	55.98	33.19	30.71	41.45	105.13		
15	Cajey	44.24	102.36	28.44	98.33	73.00	33.98	33.12	99.82	97.41	33.95	50.63	48.37		62.70	71.05	37.79	49.77	58.42	64.58	79.76	31.35	41.77	39.41	46.73	95.27		
16	Ceiba	61.04	139.29	69.67	137.48	105.79	60.82	72.29	141.79	138.91	51.67	42.15	45.68	62.70		128.28	96.23	56.83	108.44	25.58	122.25	63.89	57.82	45.60	37.04	130.11		
17	Ciales	62.89	110.61	57.98	108.14	57.47	93.68	49.50	121.75	115.07	76.94	94.75	88.51	71.05	128.28		55.56	52.93	40.11	84.54	65.74	60.67	47.92	59.68	72.81	65.80		
18	Comerio	46.59	144.92	32.13	140.17	92.98	61.02	31.45	147.16	142.06	43.44	67.97	62.63	37.79	96.23	55.56		42.96	40.70	66.35	77.52	41.96	34.81	40.20	51.96	86.98		
19	Condadc	27.76	105.21	50.18	105.25	70.75	60.30	48.90	113.82	109.94	38.32	34.68	31.27	49.77	56.83	52.93	42.96		55.72	54.65	97.11	59.71	28.23	38.29	51.64	95.12		
20	Corozal	43.18	130.37	48.87	128.24	75.27	81.70	41.60	140.72	134.42	58.25	74.65	68.42	58.42	108.44	40.11	40.70	55.72		72.50	75.82	54.23	35.86	48.07	61.70	77.21		
21	Fajardo	59.73	138.60	70.96	137.34	104.67	64.28	73.10	142.65	139.55	52.43	40.22	43.97	64.58	25.58	84.54	66.35	54.65	72.50		123.54	67.02	56.83	46.22	40.55	129.07		
22	Guanica	89.40	62.30	72.62	51.77	64.08	86.80	70.66	41.24	40.94	91.14	106.17	102.78	79.76	122.25	65.74	77.52	97.11	75.82	123.54		82.54	90.36	97.35	106.46	64.72		
23	Guayama	55.01	109.87	37.91	104.68	82.59	24.32	43.02	103.44	101.71	41.95	57.35	55.98	31.35	63.89	60.67	41.96	59.71	54.23	67.02	82.54		52.14	45.58	46.85	103.73		
24	Guaynab	23.81	101.77	41.99	100.80	67.98	53.17	41.01	107.86	104.27	32.08	36.94	33.19	41.77	57.82	47.92	34.81	28.23	35.86	56.83	90.36	52.14		34.57	48.87	92.33		
25	Gurabo	38.35	114.04	44.87	111.92	81.20	44.73	46.88	116.45	113.44	26.21	31.77	30.71	39.41	45.60	59.68	40.20	38.29	48.07	46.22	97.35	45.58	34.57		34.31	105.27		
26	Humaca	52.64	126.88	54.44	123.95	94.82	43.83	57.86	126.52	123.99	38.75	39.86	41.45	46.73	37.04	72.81	51.96	51.64	61.70	40.55	106.46	46.85	48.87	34.31		118.60		
27	Isabela	89.35	31.86	86.89	39.92	44.42	107.77	82.21	61.23	55.62	99.93	108.91	105.13	95.27	130.11	65.80	86.98	95.12	77.21	129.07	64.72	103.73	92.33	105.27		118.60		
28	Juana Dí	62.48	77.40	43.27	70.96	57.67	58.58	41.95	69.63	67.56	61.94	77.53	74.33	50.33	92.83	44.42	48.76	70.20	50.30	94.23	49.44	54.26	62.69	68.12	77.06	73.34		
29	Juncos	42.90	118.26	47.75	115.89	85.63	43.85	50.32	119.80	116.94	29.88	32.97	33.20	41.29	41.98	63.94	43.86	42.30	52.47	43.33	100.37	45.46	39.14	24.59	29.74	109.63		
30	La Plata	55.43	146.59	24.63	140.46	97.11	54.14	30.73	144.77	140.26	46.56	73.42	68.64	31.23	98.28	59.83	29.15	66.59	48.35	100.34	112.26	48.89	52.87	56.82	73.18	134.42		
31	Lajas	97.37	52.62	83.08	41.13	64.59	98.87	80.43	29.14	27.73	101.12	115.26	111.71	90.73	132.65	72.25	87.16	104.90	83.48	133.51	33.21	94.56	98.84	107.32	117.41	57.99		
32	Las Mari	131.48	52.61	115.93	40.75	66.58	147.59	109.59	60.06	51.10	143.00	163.27	157.06	129.81	195.59	88.62	119.72	143.18	108.65	195.62	59.99	140.46	135.08	152.94	172.68	54.65		
33	Las vega	139.48	57.00	120.99	39.90	77.40	151.00	115.27	48.93	40.15	149.30	170.75	164.61	134.59	202.07	96.64	125.87	151.50	116.41	202.56	53.54	143.81	142.72	159.41	178.24	63.63		
34	Luquillo	53.89	132.90	67.13	132.00	98.76	63.18	68.77	138.08	134.81	48.41	34.32	38.10	61.47	30.81	79.12	61.93	48.38	67.05	26.59	119.42	65.41	51.23	42.30	40.50	123.17		
35	Manati	47.09	71.99	49.81	72.22	37.93	71.00	44.70	83.12	78.64	58.43	66.66	62.89	57.14	87.86	27.92	47.07	53.27	35.50	86.80	69.90	67.68	50.05	63.36	77.17	62.29		
36	Maunabc	57.93	124.72	50.81	120.42	94.93	33.18	55.38	120.38	118.45	42.18	50.84	51.28	42.37	49.13	72.45	51.24	59.43	63.07	53.33	99.62	37.21	54.22	41.27	33.14	117.59		
37	Mayagü	99.62	38.77	89.11	27.13	60.23	107.13	85.62	34.90	29.46	105.97	118.57	114.86	97.30	137.61	73.89	91.92	106.71	85.86	137.81	46.25	102.81	101.69	112.01	123.44	46.47		
38	Moca	95.84	24.12	90.11	29.19	51.95	110.11	85.83	51.11	45.66	104.88	115.37	111.59	98.55	135.89	70.93	91.31	102.19	82.86	135.32	58.54	105.91	98.51	110.56	123.26	31.24		
39	Naguabo	55.91	132.92	62.04	130.64	99.96	52.74	64.95	134.25	131.51	44.63	38.86	41.76	54.81	28.14	78.56	58.59	52.97	66.90	31.90	114.50	55.75	52.40	38.88	28.92	124.11		
40	Naranjito	38.11	140.59	42.56	137.57	86.20	71.98	37.91	147.88	142.08	47.26	66.10	60.09	49.05	98.38	49.98	31.55	50.92	31.13	98.03	118.45	67.95	38.81	56.17	78.50	126.03		
41	Penuelas	72.92	65.76	56.47	58.06	54.16	72.44	54.20	55.84	53.85	74.80	89.64	86.23	63.99	106.13	50.06	61.05	80.65	59.47	107.23	36.56	68.12	73.81	81.01	90.69	63.74		
42	Ponce	68.63	74.76	49.51	67.34	59.06	63.68	48.25	64.09	62.41	68.21	83.84	80.65	56.34	98.9													

Con la información de la matriz de tiempo y considerando que la primera salida del día esta dada en forma aleatoria a cualquiera de los nodos disponibles para cada vehículo, el método utilizado para la solución del problema es el heurístico del vecino más cercano [42]. Este heurístico se encuentra en el grupo de procedimientos de construcción de rutas para solucionar problemas de optimización combinatoria de una forma eficiente con respecto al tiempo computacional y con cierta verosimilitud de entregar una solución relativamente cercana a la óptima. La justificación para seleccionar este heurístico es que permite construir de forma gradual una solución factible y a la vez trata de minimizar los costos, este también permite que se vaya haciendo una construcción en paralelo de la ruta de los vehículos, no teniendo en cuenta los nodos ya visitados.

El procedimiento del vecino más cercano para el recogido del AUC en Puerto Rico, contiene básicamente las siguientes etapas:

Paso 1. Selecciona el vehículo con mayor capacidad y comienza a determinar su ruta, iniciando en la planta de producción de biodiesel (para el mayor de todos los vehículos se verifica que ni el nodo actual, ni el nodo próximo estén en el área montañosa).

Paso 2. Encuentra el nodo más cercano al último nodo incluido en la ruta, que cumpla con las siguientes restricciones: menor tiempo de distancia ($\text{Min } T_{ij}$) que lo selecciona de la matriz de tiempo, que no haya sido ya visitado ($\text{Visita}_{ik} = 0$), que la demanda acumulada en los nodos ya visitados más la demanda del nodo que se esta evaluando, no sobrepase la capacidad del vehículo al que se le está determinando la ruta ($\text{Acum } D + D_i \leq \Sigma Q_k$), que el tiempo acumulado de los nodos ya visitados más el tiempo de regreso a la planta no sobrepase el tiempo del conductor

(Acum $T+T_{j0} \leq TC$) y si es el vehículo más pesado que el nodo que va a visitar no esté en el área montañosa.

Paso 3. Se repite el paso 2 para todos los nodos hasta que estén contenidos en una ruta o se cumpla con alguna de las restricciones de capacidad y de tiempo de conductor. Después se repite con el siguiente vehículo menos pesado.

$$\sum_{j=1}^n T_{ojk} * Ruta_{ojk} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n T_{ijk} * Ruta_{ijk} + \sum_{j=1}^n T_{jok} * Ruta_{jok} \leq T_k \quad \text{y/o} \quad \sum_{j=1}^n (\sum_{i=1}^n D_i * Visita_{_ik} + D_j) < Q_k$$

Cuando se agregan horas extras o vehículos la herramienta inicia en el paso uno, sin volver a calcular las matrices. Se pudiera realizar un trabajo futuro con recolecciones parciales de la capacidad remanentes de los vehículos.

3.4.1.5 Presentación de resultados

La Figura 3-17 muestra las rutas establecidas por la herramienta. La herramienta presenta los cuadros con las rutas de cada vehículo, mostrando por fuente a recorrer el tiempo, distancia y demanda y sus respectivos datos acumulados. Como se puede ver en la Figura 3-18 cada vehículo parte desde la planta y regresa a esta, al finalizar su ruta.



Figura 3-17. Mapa con rutas de todos los vehículos

Ruta Vehículo 4	Bayamón	Guaynabo	Río Piedras	Condado	Carolina	Canovanas	Río Grande	Luquillo	Fajardo	Ceiba	Naguabo	Humacao	Juncos	Gurabo	Caguas	Bayam
Tiempo de recorrido_4	(Minutos)	23.81	26.01	24.94	31.27	23.78	25.51	28.82	26.59	25.58	28.14	28.92	29.74	24.59	26.21	15.75
Tiempo Acum. Vehículo_4	(Minutos)	23.81	49.81	74.75	106.02	129.80	155.31	184.13	210.72	236.31	264.45	293.37	323.11	347.70	373.91	389.66
Distancia recorrida_4	(Millas)	3.17	5.01	4.12	9.39	3.15	4.59	7.35	5.49	4.65	6.79	7.43	8.11	3.83	5.17	13.13
Distancia Acum. Vehículo_4	(Millas)	3.17	8.18	12.29	21.68	24.83	29.42	36.78	42.27	46.92	53.71	61.14	69.26	73.08	78.26	91.38
Demanda por Nudo_4	(Galones)	100	200	200	100	200	150	100	200	100	200	100	100	200	150	0
Demanda Acum. Vehículo_4	(Galones)	100	300	500	600	800	950	1050	1250	1350	1550	1650	1750	1950	2100	2100

Ruta Vehículo 3	Bayamón	Naranjito	Corozal	Manatí	Ciales	Juana Díaz	Ponce	Penuelas	Guanica	Lajas	San German	Bayamón
Tiempo de recorrido_3	(Minutos)	38.11	31.13	35.50	27.92	44.42	26.31	29.29	36.56	33.21	22.97	75.03
Tiempo Acum. Vehículo_3	(Minutos)	38.11	69.24	104.74	132.66	177.08	203.39	232.68	269.24	302.45	325.42	400.45
Distancia recorrida_3	(Millas)	9.06	5.56	12.92	6.60	20.35	5.26	7.74	13.80	11.01	2.48	62.52
Distancia Acum. Vehículo_3	(Millas)	9.06	14.62	27.54	34.14	54.48	59.75	67.49	81.29	92.30	94.77	157.30
Demanda por Nudo_3	(Galones)	100	200	150	200	200	150	200	100	200	100	0
Demanda Acum. Vehículo_3	(Galones)	100	300	450	650	850	1000	1200	1300	1500	1600	1600

Ruta Vehículo 2	Bayamón	Cayey	Aibonito	La Plata	Comerio	Barranquitas	Salinas	Guayama	Arroyo	Maunabo	Bayamón
Tiempo de recorrido_2	(Minutos)	44.24	28.44	24.63	29.15	31.45	37.43	34.20	24.32	33.18	37.93
Tiempo Acum. Vehículo_2	(Minutos)	44.24	72.68	97.30	126.46	157.91	195.34	229.54	253.86	287.04	324.97
Distancia recorrida_2	(Millas)	20.20	7.04	2.31	4.58	5.72	14.53	11.83	3.60	10.98	31.61
Distancia Acum. Vehículo_2	(Millas)	20.20	27.23	29.54	34.12	39.85	54.37	66.20	69.81	80.79	112.40
Demanda por Nudo_2	(Galones)	200	100	150	200	200	150	100	200	100	0
Demanda Acum. Vehículo_2	(Galones)	200	300	450	650	850	1000	1100	1300	1400	1400

Ruta Vehículo 1	Bayamón	Arecibo	Isabela	Moca	Aguadilla	Anasco	Mayagüez	Las Vegas	Bayamón
Tiempo de recorrido_1	(Minutos)	64.94	44.42	31.24	24.12	31.66	27.13	28.55	119.48
Tiempo Acum. Vehículo_1	(Minutos)	64.94	109.36	140.59	164.71	196.37	223.50	252.05	371.53
Distancia recorrida_1	(Millas)	37.45	20.35	9.36	3.43	9.72	5.94	7.13	59.74
Distancia Acum. Vehículo_1	(Millas)	37.45	57.80	67.16	70.59	80.31	86.25	93.38	153.12
Demanda por Nudo_1	(Galones)	100	100	100	100	150	200	150	0
Demanda Acum. Vehículo_1	(Galones)	100	200	300	400	550	750	900	900

Figura 3-18. Rutas de cada Vehículo

Las Tablas 3-14 a la 3-17 y las Figuras 3-19 a la 3-22 presentan los detalles del recorrido para cada uno de los vehículos y deja el regreso a la planta desde el último nodo de la ruta identificado con una flecha.

Tabla 3-14. Cuadro ruta Vehículo 4

Ruta Vehículo_4	Bayamón	Guaynabo	Río Piedras	Condado	Carolina	Canovanas	Río Grande
Tiempo de recorrido_4	(Minutos)	23.81	26.01	24.94	31.27	23.78	25.51
Tiempo Acum. Vehículo_4	(Minutos)	23.81	49.81	74.75	106.02	129.80	155.31
Distancia recorrida_4	(Millas)	3.17	5.01	4.12	9.39	3.15	4.59
Distancia Acum. Vehículo_4	(Millas)	3.17	8.18	12.29	21.68	24.83	29.42
Demanda por Nodo_4	(Galones)	100	200	200	100	200	150
Demanda Acum. Vehículo_4	(Galones)	100	300	500	600	800	950

	Luquillo	Fajardo	Ceiba	Naguabo	Humacao	Juncos	Gurabo	Caguas	Bayamón
	28.82	26.59	25.58	28.14	28.92	29.74	24.59	26.21	15.75
	184.13	210.72	236.31	264.45	293.37	323.11	347.70	373.91	389.66
	7.35	5.49	4.65	6.79	7.43	8.11	3.83	5.17	13.13
	36.78	42.27	46.92	53.71	61.14	69.26	73.08	78.26	91.38
	100	200	100	200	100	100	200	150	0
	1050	1250	1350	1550	1650	1750	1950	2100	2100



Figura 3-19. Mapa con ruta del vehículo 4

Tabla 3-15. Cuadro ruta Vehículo 3

Ruta Vehículo_3	Bayamón	Naranjito	Corozal	Manatí	Ciales	Juana Díaz	Ponce	Penuelas	Guanica	Lajas	San German	Bayamón
Tiempo de recorrido_3	(Minutos)	38.11	31.13	35.50	27.92	44.42	26.31	29.29	36.56	33.21	22.97	75.03
Tiempo Acum. Vehículo_3	(Minutos)	38.11	69.24	104.74	132.66	177.08	203.39	232.68	269.24	302.45	325.42	400.45
Distancia recorrida_3	(Millas)	9.06	5.56	12.92	6.60	20.35	5.26	7.74	13.80	11.01	2.48	62.52
Distancia Acum. Vehículo_3	(Millas)	9.06	14.62	27.54	34.14	54.48	59.75	67.49	81.29	92.30	94.77	157.30
Demanda por Nodo_3	(Galones)	100	200	150	200	200	150	100	200	200	100	0
Demanda Acum. Vehículo_3	(Galones)	100	300	450	650	850	1000	1200	1300	1500	1600	1600

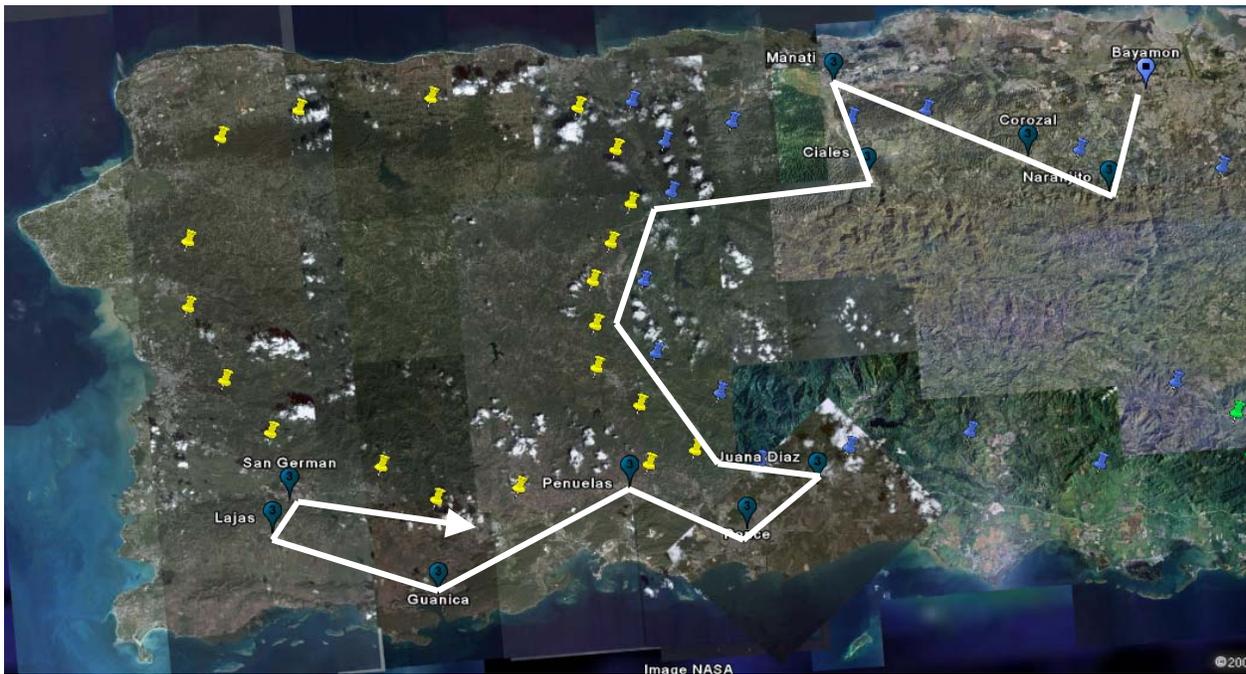


Figura 3-20. Mapa con ruta del vehículo 3

Tabla 3-16. Cuadro ruta Vehículo 2

Ruta Vehículo_2	Bayamón	Cayey	Aibonito	La Plata	Comerio	Barranquitas	Salinas	Guayama	Arroyo	Maunabo	Bayamón
Tiempo de recorrido_2	(Minutos)	44.24	28.44	24.63	29.15	31.45	37.43	34.20	24.32	33.18	37.93
Tiempo Acum. Vehículo_2	(Minutos)	44.24	72.68	97.30	126.46	157.91	195.34	229.54	253.86	287.04	324.97
Distancia recorrida_2	(Millas)	20.20	7.04	2.31	4.58	5.72	14.53	11.83	3.60	10.98	31.61
Distancia Acum. Vehículo_2	(Millas)	20.20	27.23	29.54	34.12	39.85	54.37	66.20	69.81	80.79	112.40
Demanda por Nodo_2	(Galones)	200	100	150	200	200	150	100	200	100	0
Demanda Acum. Vehículo_2	(Galones)	200	300	450	650	850	1000	1100	1300	1400	1400

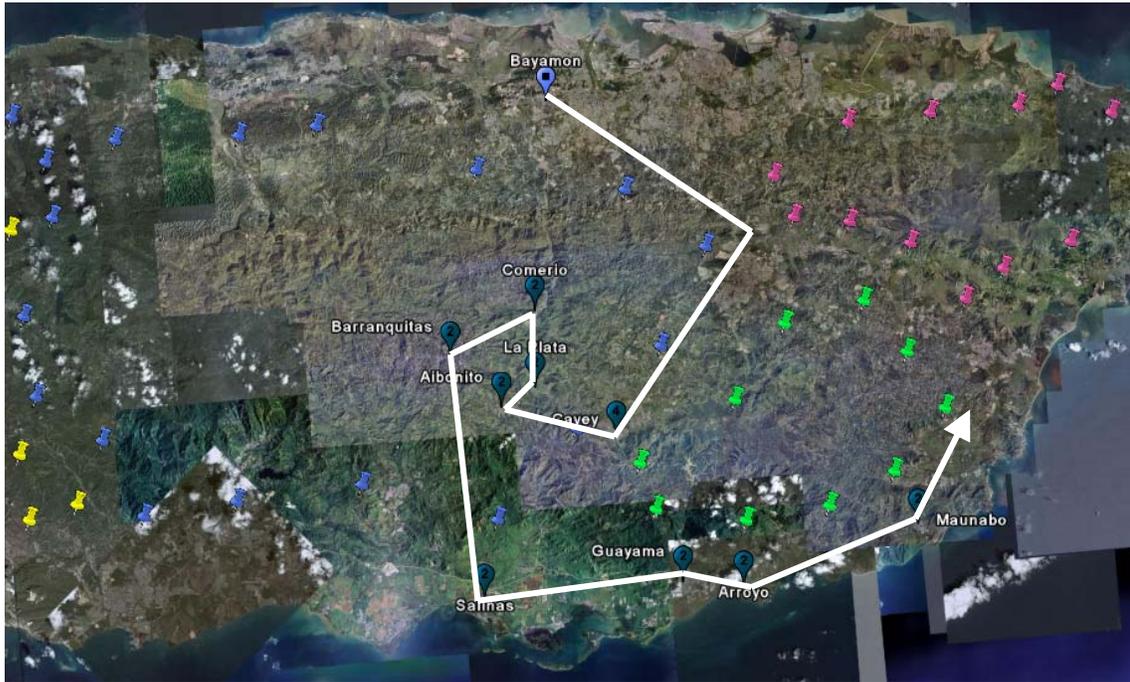


Figura 3-21. Mapa con ruta del vehículo 2

Tabla 3-17. Cuadro ruta Vehículo 1

<i>Ruta Vehículo_1</i>	<i>Bayamón</i>	<i>Arecibo</i>	<i>Isabela</i>	<i>Moca</i>	<i>Aguadilla</i>	<i>Anasco</i>	<i>Mayagüez</i>	<i>Las vegas</i>	<i>Bayamón</i>
Tiempo de recorrido_1	(Minutos)	64.94	44.42	31.24	24.12	31.66	27.13	28.55	119.48
Tiempo Acum. Vehículo_1	(Minutos)	64.94	109.36	140.59	164.71	196.37	223.50	252.05	371.53
Distancia recorrida_1	(Millas)	37.45	20.35	9.36	3.43	9.72	5.94	7.13	59.74
Distancia Acum. Vehículo_1	(Millas)	37.45	57.80	67.16	70.59	80.31	86.25	93.38	153.12
Demanda por Nodo_1	(Galones)	100	100	100	100	150	200	150	0
Demanda Acum. Vehículo_1	(Galones)	100	200	300	400	550	750	900	900



Figura 3-22. Mapa con ruta del vehículo 1

En los cuadros resumen por cada vehículo que se muestran en la Figura 3-23, se determina el número de clientes que visita (n de k), el porcentaje de utilización de la capacidad (Demanda Acumulada por Vehículo / Capacidad del Vehículo * 100), el porcentaje utilizado del tiempo del conductor (Tiempo acumulado por vehículo / Tiempo del conductor *100), el costo fijo por pago al conductor (8 horas * Pago por hora + Total de horas extras * Pago por hora * 1.5), el costo por horas extras (Total de horas extras * Pago por hora * 1.5) y por ultimo, el costo variable (Costo variable * Distancia acumulada de cada vehículo).

$$\sum_{k=1}^{m \min} \left(\sum_{j=1}^n Dist_{oj} * Ruta_{ojk} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Dist_{ij} * Ruta_{ijk} + \sum_{j=1}^n Dist_{io} * Ruta_{jok} \right) * Cvk$$

Cuadro Resumen del Vehiculo_4	
Clientes Visitados por el Vehiculo_4	12
% Utilizado de la Capacidad del Vehiculo_4	43.75%
% Utilizado del Tiempo del conductor_4	96.29%
Costo Fijos Conductor Vehiculo_4	48
CF Horas Extras_4	0
Costo Variables Vehiculo_4	42.88

Cuadro Resumen del Vehiculo_3	
Clientes Visitados por el Vehiculo_3	11
% Utilizado de la Capacidad del Vehiculo_3	51.67%
% Utilizado del Tiempo del conductor_3	96.00%
Costo Fijos Conductor Vehiculo_3	48
CF Horas Extras_3	0
Costo Variables Vehiculo_3	33.54

Cuadro Resumen del Vehiculo_2	
Clientes Visitados por el Vehiculo_2	9
% Utilizado de la Capacidad del Vehiculo_2	64.00%
% Utilizado del Tiempo del conductor_2	97.14%
Costo Fijos Conductor Vehiculo_2	48
CF Horas Extras_2	0
Costo Variables Vehiculo_2	42.30

Cuadro Resumen del Vehiculo_1	
Clientes Visitados por el Vehiculo_1	9
% Utilizado de la Capacidad del Vehiculo_1	72.50%
% Utilizado del Tiempo del conductor_1	95.81%
Costo Fijos Conductor Vehiculo_1	48
CF Horas Extras_1	0
Costo Variables Vehiculo_1	38.22

Figura 3-23. Cuadros Resumen por Vehículo.

Luego de los resúmenes por vehículo, la herramienta presenta el cuadro resumen del total de vehículos necesarios para cumplir con la demanda del día. Como se puede observar en la Figura 3-24, se totaliza el costo variable, costo fijo del pago de los conductores y el pago de sus horas extras. Se presenta la demanda total del día, se totaliza la demanda recogida por los vehículos y el porcentaje de la demanda total recogida. En la hoja de costos por vehículo (ver Anejo VIII) se ha determinado una ganancia por galón recogido, este valor es multiplicado por la diferencia de la demanda total del día y los galones recogidos, para determinar un valor por todos los galones que se dejaron de recoger, con el fin de comparar en las iteraciones si es costo eficiente pagar horas extras o enviar un vehículo adicional. Por último el cuadro muestra el total de fuentes visitadas por los vehículos, cuantas fuentes no fueron visitadas, debido a que se sobrepasó el tiempo del conductor o la capacidad del vehículo y el porcentaje de fuentes visitadas por todos los vehículos.

Cuadro Resumen de los 4 Vehículos	
Costo Variable total de los 4 Vehículos	\$157
Costo fijo conductor total de los 4 Vehículos	\$192
CF Horas Extras de los 4 Vehículos	\$0
Demanda total del día	9850
Demanda recogida por los 4 Vehículos	6350
Porcentaje de la demanda total recogida por 4 Vehículos	64.47%
Costos del aceite no recogido	\$350
Total de fuentes visitadas	41
Total de fuentes no visitadas	22
Porcentaje de fuentes visitadas por 4 Vehículos	65.08%

Figura 3-24. Cuadros Resumen para todos los Vehículo.

Una vez finalizado el proceso la herramienta activa el cuadro resumen; en este se muestra las fuentes no visitas y las que se eliminaron en el caso que la demanda del día exceda la capacidad total de los vehículos disponibles para hacer el recorrido. En este cuadro mensaje

también se resumen los datos que se mencionaron en el cuadro anterior de demanda recogida y no recogida, de fuentes visitadas y no visitadas y sus respectivos porcentajes. Finalmente se presenta el tiempo (en segundos) que se tomó el programa para calcular las rutas. Cuando se quedan fuentes sin visitar porque se cumple cualquiera de las restricciones de tiempo del conductor o de capacidad de los vehículos, se evalúa agregando un vehículo adicional, empezando con el siguiente menos pesado o con el menos pesado de todos, dependiendo el número mínimo de vehículos que determina la herramienta. Para ejemplificar, la herramienta selecciona solo el vehículo 2 como m_{min} , después evalúa el costo de la alternativa utilizando el vehículo 2 y 3, después 2 y 4 y finalmente 2 y 1. Y así se puede determinar cuál de estas 4 opciones es más económica.

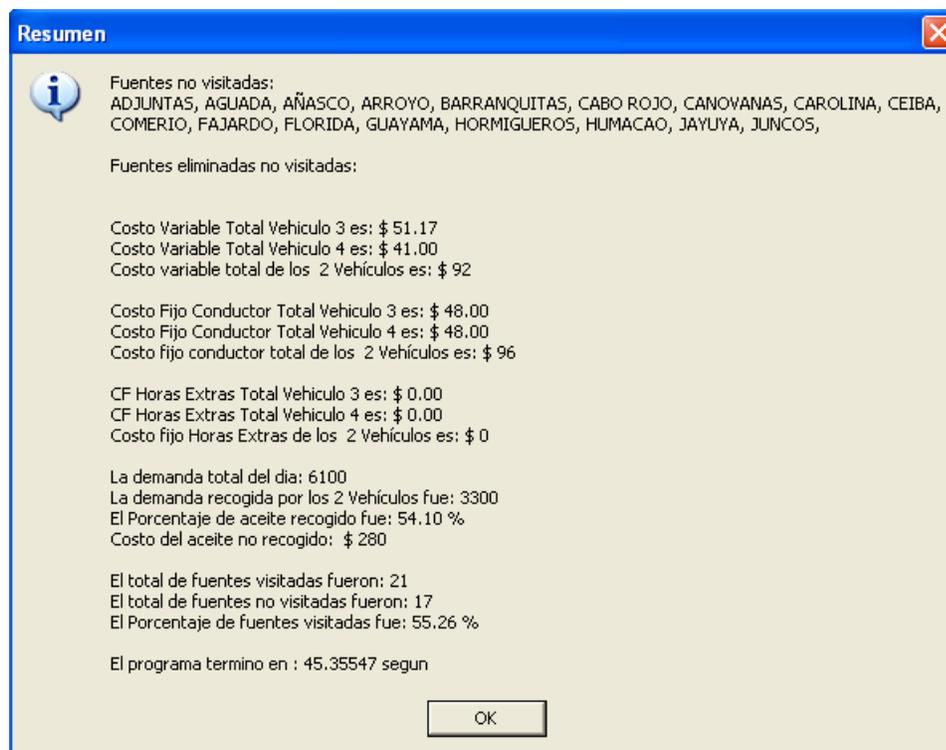


Figura 3-25. Cuadro resumen de resultados de la herramienta

3.5 Evaluación de la herramienta respecto a el banco de problemas de Christofides y Eilon

La tabla 3-18 muestra los resultados obtenidos de la evaluación entre el banco de problemas de Christofides y Eilon y la herramienta diseñada en este proyecto.

Tabla 3-18. Comparación entre los problemas de Christofides y Eilon contra MRAUC_PR.

n	k	Q	Respuesta C&E	MRAUC_PR	% de Error	T. Respuesta (Segundos)
13	4	6000	290	339	17%	4.76
22	4	6000	375	458	22%	4.27
23	3	4500	569	778	37%	4.82
30	3	4500	534	611	14%	5.22
33	4	8000	835	1012	21%	6.99
51	5	160	521	742	42%	6.99
76	7	220	683	1070	57%	5.63
76	8	180	735	1026	40%	6.18
76	10	140	832	1186	43%	7.99
76	14	100	1032	1392	35%	7.86
101	8	200	817	1155	41%	6.52
101	14	112	1077	1825	69%	8.66

El error para los caso de 13, 22, 30 y 33 nodos promedia 18.7 %, para el problema de 23 nodos se sale de ese promedio a 37 % y aumenta drásticamente para los últimos siete casos (46.7 %). El heurístico de la herramienta genera soluciones relativamente buenas para nodos menores de 25 nodos lo que se ajusta a la demanda diaria actual en la empresa de biodiesel. Hay que tomar en cuenta que la lógica definida en este proyecto determina las rutas de acuerdo al peso de los vehículos, e inicia determinando toda la ruta del vehículo con mayor capacidad y teniendo como restricción el no visitar nodos en el área montañosa. Y aunque en estos problemas todos tienen la misma capacidad, inicia con el último vehículo y determina la ruta completa, mientras que el

de la literatura evalúa todos los vehículos en paralelo y no tienen orden para llenar las rutas. Estos resultados son el aliciente para realizar un proyecto futuro donde la lógica de asignación de vehículos deba usar una herramienta más efectiva que persiga soluciones más cercanas al óptimo.

El promedio para todos los tiempos de respuestas es de 5.84 segundos, lo cual es importante para que el usuario de la herramienta obtenga y comunique de forma rápida las rutas a seguir por los conductores. Esto es uno de los objetivos principales de este proyecto para que dicha herramienta de software sea aceptada y usada por los usuarios.

CONCLUSIONES

La herramienta diseñada en este proyecto permite y provee una planificación diaria de la recolección del aceite usado de cocina, utilizando un mecanismo que es fácil de usar por cualquier empleado que tenga un conocimiento básico de Excel, lo que garantiza su aceptación y uso en las empresas que deseen tener un mayor control de los costos de transporte en la recolección de algún producto. La herramienta se puede adaptar en todo tipo de recogido de desperdicios a reciclar en Puerto Rico y es abundante el trabajo futuro que se puede realizar en esta área.

Las empresas de Puerto Rico basan la planificación de las rutas diarias en la experiencia de los conductores, situación que está afectando el cumplimiento en las visitas a los clientes y en la cantidad que se recoge. Es necesario un interés genuino por parte del gobierno y de los empresarios para que se haga un aporte económico, que sabiendo que va a ser alto, optimizaría la planificación de las rutas de recogido al implementar tecnologías avanzadas de información geográfico y metaheurísticos. Estos sistema de información [42] [48] permitirían: geo-referenciar las localizaciones correctas de los clientes, centros de tránsito y almacenes, realizar el seguimiento de los vehículos, el intercambio de información sobre localizaciones e itinerarios con el navegador, compartir e integrar la información sobre rutas con clientes y proveedores, exportar información sobre localizaciones e itinerarios para otro software y determinar la distribución y sentido de circulación de las carreteras de Puerto Rico (red de tránsito).

Viendo que no existen leyes ni controles en Puerto Rico referente al reciclaje del aceite usado de cocina, es importante que el gobierno tome conciencia del problema ambiental que éste genera y determine las leyes necesarias para el manejo adecuado de este residuo y los respectivos controles para su cumplimiento. Las entidades gubernamentales participantes en la cadena de recolección deben tomar un papel más activo y trabajar con la comunidad para dar a conocer la importancia de no tirar este residuo por el desagüe, lo que permitiría que fuera mayor la cantidad de aceite que se pudiera recuperar para la elaboración del Biodiesel.

La gran variedad de fuentes en donde se puede recolectar el aceite usado de cocina en Puerto Rico hace necesario el tener una buena base de datos, ya que esta permite que se pueda realizar un seguimiento adecuado a los clientes, determinando en un futuro; frecuencia de recogido, tamaño adecuado de contenedor y manejo del residuo por parte del cliente. Viendo que el heurística utilizado en la herramienta no genera soluciones costo efectivas cuando los nodos son mayores de 25 y en el futuro el número de fuentes a visitar diariamente va a aumentar, es importante realizar un trabajo futuro programando la herramienta utilizando un meta heurístico que genere soluciones mas cercanas a la optima.

Al proporcionar un plan diario de actividades y contar con la información necesaria para poder determinar las frecuencias de las visitas, es factible dimensionar la cantidad mínima de vehículos requeridos para cumplir con la demanda de toda la Isla, lo que permite en un futuro próximo realizar algún nivel de “outsourcing”, permitiendo una reducción considerable de los costos de transporte y reducir el consumo de combustible.

TRABAJOS FUTUROS

El modelo de optimización presentado en la sección 3.1 es un buen punto de partida en el esfuerzo de obtener la mejor solución posible en términos de costo para una investigación futura sobre este tema, la cual también debería ser complementada con la secuenciación de puntos a visitar dentro de cada ciudad, ya que la herramienta solo permite determinar la secuencia en que serán visitadas las principales ciudades de Puerto Rico. En este trabajo también se puede tener en cuenta las recolecciones parciales de la capacidad remanentes de los vehículos e identificar puntos óptimos para la localización de plantas futuras.

Un programa de reciclaje de aceites usados de cocina busca desarrollar y promover alternativas para la disposición legal de este residuo, mediante el establecimiento de reglas con oportunidades claras para informar y motivar a la población en el reciclaje de esta fuente de energía desperdiciada por tantos años en Puerto Rico. Algunas ideas para lograr desarrollar un buen nivel de compromiso en el sector de negocios y residencial se presentan a continuación.

Ideas Sector de Negocios

- Involucrar a las asociaciones y a los empresarios de los restaurantes, hoteles, y todas las fuentes industriales de este residuo, para que sus establecimientos ingresen en un programa para la recuperación del aceite usado de cocina en la Isla con algún tipo de incentivo gubernamental.
- Desarrollar campañas educativas agresivas y de alto impacto para conservar la energía y promover el uso de equipos de menor consumo energético y de mayor eficiencia. Estas

campañas se tienen que trabajar y promover en el interior de todas las agencias de gobierno, en las escuelas y en las corporaciones públicas

- Crear centros de recolección, agrupados por sectores acordes a su ubicación que se determine en la base de datos, permitiendo así una reducción de costos en el transporte. Estos se ubican de acuerdo a la cercanía con los puntos emisores y a las facilidades en vías de acceso rápido, por ejemplo, en plazoletas de comida, zonas de restaurantes, barrios, pueblos, etc.
- Crear normatividad para el manejo de este residuo y exigir que todas las fuentes participen en el plan de recuperación. Es necesario contar con legislación específica, diseñar incentivos por la recolección y entrega de aceites usados y ejercer un control oficial efectivo sobre el manejo del residuo. El gobierno debe controlar a las fuentes industriales de aceite de cocina usado, en la reutilización del aceite vegetal y el manejo de su desecho con inspecciones y verificaciones periódicas que deben realizarse en los comercios. A futuro promover las certificaciones de calidad de procesos y productos.
- Entregar Certificados de participación en el programa, con validez por un periodo predefinido, donde se reconoce la labor ambiental que realiza al almacenar desechos para su posterior reciclaje.
- Desarrollar métodos de motivación dirigidos a las fuentes emisoras incentivándolas hacia el reciclaje de sus aceites usados.

Ideas Sector Residencial

- Informar y concientizar al ciudadano de la importancia medioambiental de la recuperación del aceite de cocina usado con campañas masivas en medios de comunicación. Esto se puede lograr con la ayuda de la fundación Yo Limpio a Puerto Rico con la que se puede llegar a un acuerdo, al igual que con la creadora de la tirilla cómica Bonifacio que es muy conocido por el pueblo de Puerto Rico, por sus buenos mensajes publicados diariamente en el periódico el Vocero.
- Dar a conocer a los ciudadanos las ventajas y beneficios ambientales de la separación y adecuada gestión de los aceites domésticos usados, evitar el vertido de un número importante de galones de aceite, creando un punto de recolección de este aceite en un espacio de referencia ciudadana.
- Diseñar pequeñas plantas pilotos de biodiesel en las escuelas públicas de la Isla, con la idea de generar conciencia de reciclaje en los niños y utilizar las escuelas como puntos de recolección, para que los ciudadanos puedan ir a depositar el aceite reciclado en sus hogares en botellas plásticas o de vidrio. De no ser posible la creación de las plantas pilotos se pueden organizar presentaciones para preparar biodiesel en la clase de Ciencias.
- Utilizar supermercados, escuelas, universidades como puntos de recolección.
- Dejar en los hogares un recipiente para que los que recogen las basuras separen estos recipientes o que los ciudadanos lleven este recipiente a los puntos de recolección.

REFERENCIAS

- [1] Altinkemer, K. & Gavish, B. (1991). Parallel savings based heuristic for the delivery problem. *Operations Research*. 39, 456–469.
- [2] Appenzeller, T. (2004, junio). The End of Cheap Oil. *National Geographic*, 80-109.
- [3] Augerat, P., Belenguer, J., Benavent, E., Corberán, A., Naddef, D., & Rinaldi, G. (1995). Computational results with a branch and cut code for the Capacitated Vehicle Routing Problem. Technical Report RR949-M, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- [4] Autoridad de Desperdicios Sólidos. (2004). Plan estratégico para el manejo de los residuos sólidos en Puerto Rico. Recuperado 23 de febrero de 2007, de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd52/pmrs/intro.pdf>
- [5] Asociación de Restaurantes de Puerto Rico. Directorio de Restaurantes de ASORE. Recuperado mayo de 2007, de http://www.asorepr.net/portal/index.php?option=com_directory&Itemid=53.
- [6] ASTM (Mayo 2007) Specification for Biodiesel (B100) – ASRMD6751-07b. Recuperado mayo 17 de 2007, de <http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D6751-03.htm> y http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/BDSpec.pdf

- [7] Baldacci, R., Hadjiconstantinou, E. & Mingozzi, A. (2004). An exact algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem based on a two-commodity network flow formulation. *Operations Research*. 52(5), 723–738.
- [8] Ballou, R. H. *Logística. Administración de la cadena de suministro*. Prentice-Hall, 2004.
- [9] Beasley, J. E. (1983). Route-first cluster-second methods for vehicle routing. *Omega*. 11, 403–408.
- [10] Bourke, Paul. (1987) Determining if a point lies on the interior of a polygon. Recuperado abril de 2007, de <http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/geometry/insidepoly/>.
- [11] Bullnheimer, B., Hartl, R. F. and Strauss, C. (1999). An improved ant system algorithm for the vehicle routing problem. *Annals of Operations Research*. 89(1), 319-328.
- [12] Caribbean Business News Paper. (2006). Business Directory. Casiano Communications Inc.
- [13] Carlstein, Ricardo G. (2006). El biodiesel como solución energética. Recuperado el 15 de julio de 2007, de <http://servicios.invertia.com/foros/read.asp?idMen=7031732>.
- [14] Clarke, G. & Wright, J. V. (1964). Scheduling vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*. 12, 568–581.

- [15] Colucci, J.A., Alape, F.A. & Borrero, E. (2005). Biodiesel from Alkaline Transesterification Reaction of Soybean Oil Using Ultrasound Mixing. *JAOCS*, 82(7), 465-542,
- [16] Conceptos de Biomasa. Recuperado 29 de abril de 2007, de <http://es.wikipedia.org/wiki/Biog%C3%A1s>,
http://www.wikilearning.com/que_es_el_etanol-wkccp-20796-1.htm.
- [17] Conceptos de Energía renovable: Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico. Administración de Asuntos de Energía. Recuperado 29 de abril de 2007, de <http://www.aae.gobierno.pr/InformacionEnergetica/index.html>.
- [18] Cordeau, J. F., Laporte, G. & Mercier, A. (2001). A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. *Journal of the Operational Research Society*. 52, 928–936.
- [19] Departamento de Transporte y Obras Públicas. Calculo de Millaje. Recuperado 20 de noviembre de 2007, de <http://www.dtop.gov.pr/ACT/tablamillaje.pdf>.
- [20] Departamento de Hacienda de Puerto Rico. (2006). Ingresos de Petróleo Crudo y Productos Derivados. Recuperado 6 de mayo de 2007, de http://www.hacienda.gobierno.pr/estadisticas/productos_derivados.html
- [21] Dueck, G. (1993). New optimization heuristics: the great deluge algorithm and the record-to-record travel. *Journal of Computational Physics*. 104, 86–92.
- [22] Dueck, G. & Scheurer, T. (1990). Threshold accepting: a general purpose optimization algorithm. *Journal of Computational Physics*. 90, 161–175.

- [23] Fisher, M. L. & Jaikumar, R. (1981). A generalized assignment heuristic for the vehicle routing problem. *Networks*. 11, 109–124.
- [24] Formula Haversine. Calculate distance, bearing and more between two Latitude/Longitude points Recuperado 21 de Marzo de 2007, de <http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>.
- [25] Foster, B.A. & Ryan, D. M. (1976). An integer programming approach to the vehicle scheduling problem. *Operations Research*. 27, 367–384.
- [26] Gendreau, M., Laporte, G. & Potvin, J.-Y. (2002). Metaheuristics for the Capacitated VRP. In Toth, P. & Vigo, D., *The Vehicle Routing Problem*. SIAM.
- [27] Gillett, B. E. & Miller, L. R. (1974). A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem. *Operations Research*. 22, 340–349.
- [28] Informe elaborado por la corporación para el desarrollo industrial de la biotecnología y producción limpia - CORPODIB – al Departamento de Transporte Colombiano para la elaboración de una planta de Biodiesel. (2003). Recuperado 30 de abril de 2007, de www.corpodib.com.
- [29] Junta de Planificación de Puerto Rico. (2002). Importaciones a Puerto Rico de petróleo y productos derivados – Importaciones de aceite y grasas animales. Recuperado 15 de mayo de 2007, de http://jpops02.jp.gobierno.pr/portal/page?_pageid=133,34447,133_41205&_dad=portal&_schema=PORTAL

- [30] McCormick, R. L. y Westbrook S. R. Biodiesel y mezclas de biodiesel. Recuperado el 7 de junio de 2007, de:
<http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/Q207/q207aprmccwes.html>
- [31] Miller, D. L. (1995). A matching based exact algorithm for capacitated vehicle routing problems. *ORSA Journal on Computing*. 7, 1–9.
- [32] Naddef, D. & Rinaldi, G. (2002). Branch-and-cut algorithms for the Capacitated VRP. In Toth, P. & Vigo, D. *The Vehicle Routing Problem*. SIAM.
- [33] National Biodiesel Board website. Biodiesel definition. Recuperado el 12 de Julio de 2007, de: <http://biodiesel.org/resources/definitions/default.shtm>
- [34] National Renewable Energy Laboratory. (1998). A Look Back at the U.S. Department of Energy’s Aquatic Species. Program—Biodiesel from Algae. Recuperado 25 de febrero de 2007, de <http://www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/24190.pdf>
- [35] Oficina de Censo de la Junta de Planificación de Puerto Rico. Censo del 2000 “Perfil demográfico de Puerto Rico - Censo 1990 - 2000”. Recuperado 15 de marzo de 2007, de <http://www.gobierno.pr/Censo/Inicio/Default>
- [36] Osman, I. H.. (1993). Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problems. *Annals of Operations Research*. 41, 421– 451.
- [37] Portal de información y noticias sobre biodiesel y energía renovable. Evolución Histórica del biodiesel. Recuperado el 12 de julio de 2007, de: http://www.biodiesel.com.ar/?page_id=5

- [38] Price WaterHouse Coopers & APPA. (2005). Una Estrategia de Biocarburantes para España (2005-2010). Recuperada 15 de mayo de 2007, de http://www.appa.es/descargas/Estrategia_Biocarbur_APPA.pdf.
- [39] Prins, C. (2004). A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*. 31, 1985–2002.
- [40] Rochat, Y. & Taillard, E. D. (1995). Probabilistic diversification and intensification in local search for vehicle routing. *Journal of Heuristics*. 1, 147–167.
- [41] Rodríguez, D. M., & Medaglia A., Ph.D. (2005) Configuración Logística para Tratamiento de Residuos Hospitalarios Peligrosos. Centro para la Optimización y Probabilidad Aplicada. Departamento de Ingeniería Industrial. Universidad de los Andes.
- [42] Rodríguez Villalobos, Alejandro. (2006). Grafos: herramienta informática para el aprendizaje y resolución de problemas reales de teoría de grafos. Departamento de Organización de Empresas, Escuela Politécnica Superior de Alcoy (EPSA), Universidad Politécnica de Valencia.
- [43] Rosenkrantz D., Stearns R. & Lewis II P.: An Analysis of Several Heuristics for the Traveling Salesman Problem. *Society for Industrial and Applied Mathematics*. 6, 563-581.
- [44] Ryan, D. M., Hjorring, C. & Glover, F. (1993). Extensions of the petal method for vehicle routing. *Journal of the Operational Research Society*. 44, 289–296.
- [45] Semet, F. & Laporte, G. (2002). Classical heuristics for the Capacitated VRP. In Toth, P. & Vigo, D., *The Vehicle Routing Problem* (pp. 109–128).

- [46] Sheehan, J., V. Camobreco, J. Duffield, M. Graboski, & H. Shapouri. (1998) Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus," Report from the National Renewable Energy Laboratory for the U.S. Department of Energy's Office of Fuels Development and for the U.S. Department of Agriculture's Office of Energy, NREL/SR-580-24089.
- [47] Tarantilis, C.D., Diakoulaki, D. & Kiranoudis, C.T. (2004). "Combination of geographical information system and efficient routing algorithms for real life distribution operations". European Journal of Operational Research, 152, 437-453
- [48] Tarantilis, G. Ioannou, & G. Prastacos.(2005). Advanced vehicle routing algorithms for complex operations management problems. Operational Research and Food Logistics. Journal of Food Engineering, 70, 455-471
- [49] Tavakkoli, N. Safaei, & Y. Gholipour. (2006).A hybrid simulated annealing for capacitated vehicle routing problems with the independent route length. Applied Mathematics and Computation, 176 (2), 445-454.
- [50] Toth, P. & Vigo ,D. ,(2002). The Vehicle Routing Problem. Monographs on Discrete Mathematics and Applications. SIAM.
- [51] Toth, P. & Vigo, D. (2003). The granular tabu search and its application to the vehicle-routing problem. INFORMS Journal on Computing. 15(4), 333–346.
- [52] Thompson, P & Gaver D. (1973). Programing and Probability models in Operations Reserch, p. 233, Brooks/Cole Publishing Company.

- [53] Visita Edf. Agencias Ambientales. (2007, febrero) Primer Piso - División de Permisos de Manejo de Desperdicios no peligrosos.
- [54] Wark, P. & Holt, J. (1994). A repeated matching heuristic for the vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*. 45, 1156–1167.
- [55] Zhang, Y., Dube, M. A., McLean, D. D., & Kates, M. (2003). "Biodiesel Production from Waste Cooking Oil: 1. Process Design and Technological Assessment." *Bioresource Technology*, 89(1), 1-16.

El Calentamiento Global y el Efecto invernadero

El calentamiento global se genera por el uso de combustibles fósiles, principalmente por el dióxido de carbono (CO^2), gas responsable en un 50%, del aumento en el efecto invernadero).

El efecto invernadero [28] es un fenómeno atmosférico natural que permite mantener la temperatura del planeta, al retener parte de la energía proveniente del Sol. El aumento de la concentración de dióxido de carbono (CO^2) proveniente del uso de combustibles fósiles ha provocado la intensificación del fenómeno y el consecuente aumento de la temperatura global, el derretimiento de los hielos polares y el aumento del nivel de los océanos.

El vapor de agua, el dióxido de carbono (CO^2) y el gas metano forman una capa natural en la atmósfera terrestre que retiene parte de la energía proveniente del Sol. El uso de combustibles fósiles y la deforestación ha provocado el aumento de las concentraciones de CO^2 y metano, además de otros gases, como el óxido nítrico, que aumentan el efecto invernadero.

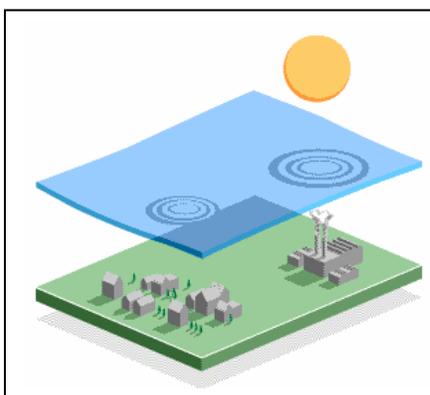


Figura 0-1. Capa protectora natural para la protección de los rayos solares

Continuación de Anejo I

La superficie de la Tierra es calentada por el Sol. Pero ésta no absorbe toda la energía sino que refleja parte de ella de vuelta hacia la atmósfera.

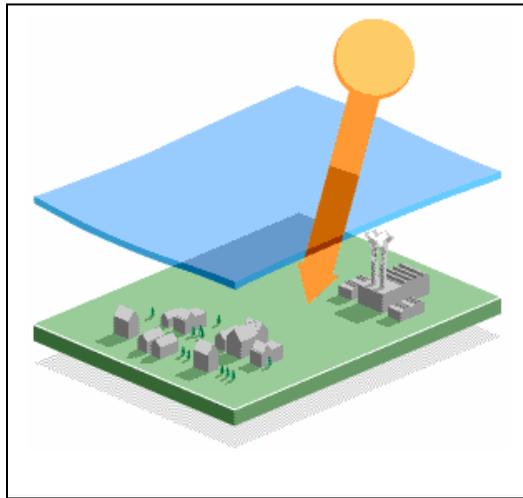


Figura 0-2. Acción de los rayos solares en la superficie terrestre.

Alrededor del 70% de la energía solar que llega a la superficie de la Tierra es devuelta al espacio. Pero parte de la radiación infrarroja es retenida por los gases que producen el efecto invernadero y vuelve a la superficie terrestre.

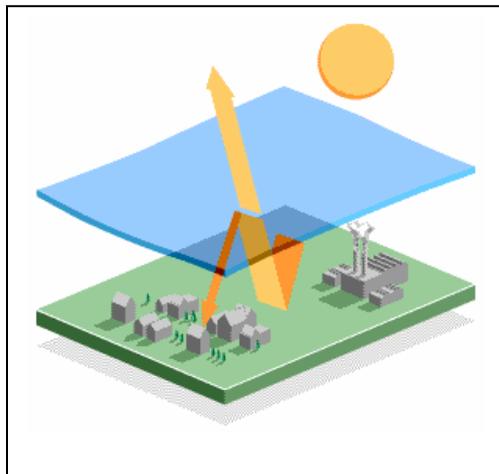


Figura 0-3. Captura de radiación solar por parte de los gases de invernadero

Continuación de Anejo I

Como resultado del efecto invernadero, la Tierra se mantiene lo suficientemente caliente como para hacer posible la vida sobre el planeta. De no existir el fenómeno, las fluctuaciones climáticas serían intolerables. Sin embargo, una pequeña variación en el delicado balance de la temperatura global puede causar graves estragos. En los últimos 100 años la Tierra ha registrado un aumento de entre 0.4 y 0.8 °C en su temperatura promedio.

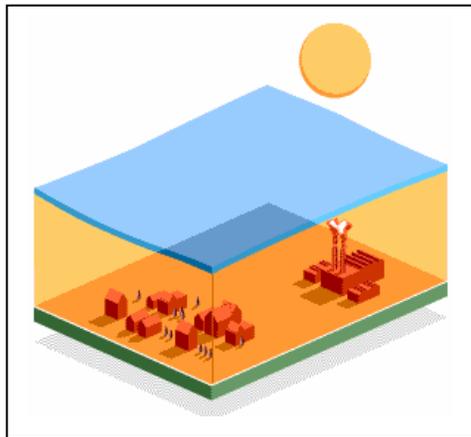


Figura 0-4. Calentamiento global de la tierra

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), con la ayuda internacional de científicos expertos en materia de clima, asesora en las negociaciones sobre el clima con los últimos avances científicos relacionados con el cambio climático. El CO² es el principal gas de invernadero, pero de ninguna forma es el único. Cada gas de invernadero tiene lo que se conoce como su "potencial de calentamiento global", una medida de su efecto relativo de calentamiento. El último informe del IPCC señala que los potenciales de calentamiento de los diversos gases de invernadero son típicamente entre un 10-30% más altos de lo que se había calculado anteriormente.

Tabla de Energías Renovables

Energías Renovables	Fuentes que se pueden usar sin destruir las condiciones de vida en el futuro, se renuevan constantemente. De provocar alguna contaminación, ésta es mínima.
Hidráulica	Proviene de la fuerza del agua que corre. La gravedad causa que el agua fluya de un terreno más alto a uno más bajo, creando una fuerza que puede ser usada para accionar generadores de turbina y producir electricidad.
De las Olas	Este es un método para recoger la energía del agua, usando las olas del océano, ya que una ola que avanza lleva consigo la energía acumulada que ha recogido del viento en su viaje a través del océano. El oleaje puede utilizarse para mover dispositivos flotantes y así generar electricidad.
Océano Termal	La energía océano termal consiste en aprovechar la diferencia de temperatura entre el agua tibia de la superficie del mar, calentada por el sol, y el agua fría de las profundidades. En una de las formas de este sistema, el agua caliente evapora un líquido que tiene un punto de evaporación bajo, como el amoníaco, para que éste, al expandirse en su forma gaseosa, mueva una turbina conectada con un generador para producir electricidad. Luego, el vapor se condensa con el agua fría y el proceso comienza de nuevo.
Solar	El sol es el mayor recurso energético y es la forma de producir energía más limpia que existe. El flujo total de la luz solar que intercepta la tierra es más de 10,000 veces las necesidades anuales de energía de la humanidad. Por día, la tierra recibe del sol una cantidad de energía equivalente a la contenida en 2 millones de barriles de petróleo. La tecnología para conversión de energía solar directamente a energía eléctrica, se logra mediante el uso de celdas fotovoltaicas y colectores solares.
Eólica	La energía eólica utiliza el viento para producir electricidad por medio de aerogeneradores que tienen que ser instalados en zonas aisladas, de gran superficie de tierra, y que la velocidad del viento sea constante.

Continuación de Anejo II

Biomasa	Esto se refiere a la materia viva y los derivados de ella. Puede ser vegetal como los residuos de los cultivos y los bosques, también incluye a los desechos de los animales y el contenido orgánico de la basura doméstica y municipal sólida. Esta materia orgánica puede ser usada como fuente de energía, se encuentra en casi todos los países y representa un valioso recurso propio. La utilización más sencilla de la biomasa como fuente de energía consiste en quemarla tras ser secada. En descomposición, produce gas metano. Otro método para utilizarla es transformándola en alcohol etílico o etanol, a través del proceso de fermentación de la caña de azúcar, melón y otros productos.
Geotermal	La energía Geotermal proviene del calor del centro de la Tierra. Cuando el agua se pone en contacto con las rocas calientes de la profundidad, absorbe la energía y ésta se convierte en vapor, que sirve para hacer funcionar las turbinas en una central eléctrica.

La tabla anterior describe los diferentes tipos de energía renovable existentes, la forma de obtenerla y los usos que se le pueden dar [17].

Tabla de Biomasa

	Definición	Materias Primas	Aplicaciones
BIOMASA (Masa Biológica)	Amplia diversidad de tipos de combustible energético que se obtiene directa o indirectamente de recursos biológicos	Residuos forestales Residuos agrícolas leñosos y herbáceos Residuos de industrias forestales y agrícolas Cultivos energéticos	Domésticas Redes de calefacción centralizada Térmicas industriales Eléctricas
BIOGÁS	Biocombustible renovable derivado de la Biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos en ausencia de aire (ambiente anaeróbico).	Residuos ganaderos Residuos biodegradables de instalaciones industriales Lodos de depuradora	Térmicas y eléctricas Bio-carburante
BIOETANOL	Biocombustible renovable derivado de la Fermentación de los azúcares que se encuentran en los productos vegetales. Puede ser utilizado como sustituto o aditivo de la gasolina convencional.	Cultivos ricos en azúcares (cereal, maíz, trigo, remolacha, caña de azúcar, yuca, etc.) Productos lignocelulósicos	Bio-carburante E25=25% Bio-etanol - 75% Gasolina

BIODIESEL	Biocombustible renovable derivado de la Transesterificación de aceites vegetales o grasas animales con un catalizador, que puede ser utilizado como sustituto o aditivo del diesel convencional.	Cultivos ricos en aceites (girasol, colza...) Aceites usados y grasas animales Fracción biodegradable de los residuos urbanos e industriales	Bio-carburante B20 = 20% Bio-diesel - 80% Diesel
------------------	--	---	--

La anterior tabla presenta los tipos de Bio-carburantes, su definición, las materias primas que se pueden utilizar para producirlos y sus aplicaciones [16].

Emisiones del biodiesel

Biodiesel es el primer y único combustible alternativo que posee una evaluación completa de emisiones y efectos potenciales sobre la salud de las personas y del medio ambiente, aprobado por E. P. A. (Environmental Protection Agency).

La siguiente tabla muestra los resultados de la evaluación [6]:

Tabla 0-1. Emisiones de biodiesel respecto a Diesel Convencional.

Tipo de Emisión	B100 (%)	B20 (%)
Reguladas		
Hidrocarburos totales sin quemar	-93	-30
Monóxido de carbono	-50	-13
Partículas en suspensión	-30	-22
Óxidos de Nitrógeno	+13	+2
No Reguladas		
Sulfatos	-100	-20
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAH)	-80	-13
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos nitrogenados. (nPAH)	-90	-50
Potencial de destrucción de la capa de Ozono	-50	-10

Como se ve en la anterior tabla, el potencial de destrucción de la capa de Ozono es notablemente menor, respecto al diesel de petróleo, sobre todo si se utiliza biodiesel B100 que elimina las emisiones de Sulfatos y óxidos de azufre (componentes esenciales de la lluvia ácida). El monóxido de carbono se reduce en un 50% y las partículas en suspensión que constituyen un gran riesgo para la salud, se reducen en un 30%. Las emisiones de hidrocarburos (un factor contribuyente en la formación localizada de smog y destrucción de la capa de ozono) es 93% más baja para el biodiesel que el combustible diesel común.

Continuación de Anejo IV

Las emisiones de Óxidos de nitrógeno (NOx) (un factor contribuyente en la formación localizada de smog y destrucción de la capa de ozono) aumentan en un 13 por ciento. Sin embargo, la ausencia de azufre en el biodiesel permite el uso de técnicas para el manejo de NOx que no pueden ser utilizadas en el diesel común y este resultado aumenta o disminuye dependiendo del tipo de motor y los procedimientos utilizados en los ensayos.

Las emisiones de los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAH) y de los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos nitrogenados (nPAH) (compuestos identificados como riesgosos para el cáncer) disminuyeron 80 y 90 % respectivamente. Lo que significa que el biodiesel reduce los riesgos de la salud respecto al diesel de petróleo.

Tabla de Importaciones de petróleo y productos derivados

IMPORTS OF PETROLEUM AND DERIVATE PRODUCTS								
FISCAL YEAR 2001								
VALUE IN THOUSANDS DOLLARS								
	Imports from U. S. A.		Imports from F. C.		Imports from V. I.		Total Imports	
	QUANTITY	VALUE	QUANTITY	VALUE	QUANTITY	VALUE	QUANTITY	VALUE
	(BBL)		(BBL)		(BBL)		(BBL)	
TOTAL	7,492,928	72,451	52,288,467	1,461,981	20,884,366	763,821	80,665,761	2,298,253
Total crude petroleum	N/A	361	1,025,414	28,935	0	0	1,025,414	29,296
Total fuel oils	196,180	9,775	32,821,441	776,165	2,325,524	66,389	35,343,145	852,329
Total gasoline	289,256	11,990	6,920,429	250,775	11,954,114	468,025	19,163,799	720,790
Total motor fuel	50,590	1,939	657,269	25,804	4,566,049	170,662	5,273,908	198,405
Total other motor fuel	11	3	0	0	0	0	11	3
Total kerosene	5,960	131	0	0	17,915	627	23,875	758
Total naphtha	6,768,714	28,449	3,548,252	121,742	0	0	10,316,966	150,191
Total lub oils	179,125	19,485	23,594	2,249	0	0	202,719	21,734
Total diesel	0	0	7,291,924	256,295	2,020,764	68,118	9,312,688	324,413
Total other oils	3,092	318	144	16	0	0	3,236	334

Source: Puerto Rico Planning Board, Program of Economic and Social Planning ,
Subprogram of Economic Analysis.

La tabla anterior muestra un ejemplo de la información suministrada por la Junta de Planificación, de las importaciones de petróleo y productos derivados para el año fiscal 2001 [29].

Anejo VI

Importaciones de aceite y grasas animales desde Estados Unidos y países extranjeros a Puerto Rico.

TABLE - 1 SHIPMENTS OF MERCHANDISE FROM THE UNITED STATES TO PUERTO RICO,
BY COMMODITY: FISCAL YEAR 2001

COMM CODE	DESCRIPTION	UNIT	QUANTITY	VALUE - \$
	ANIMAL OR VEGETABLE FATS AND OILS AND THEIR CLEAVAGE PRODUCTS; PREPARED EDIBLE FATS; ANIMAL OR VEGETABLE WAXES.....	TOTAL	83,344,065	76,960,916
1501000020	LARD	KG	4,673,886	3,400,802
1501000080	OTHER PIG FAT AND POULTRY FAT, RENDERED, NESOI	KG	208,577	220,024
1502000020	TALLOW, EDIBLE	KG	393,955	170,949
1502000040	TALLOW, INEDIBLE	KG	2,177,609	879,373
1502000060	FATS OF BOVINE ANMLS SHEEP/GOAT EX TALLOW/RAW/RNDR	KG	23,185	13,280
1503000000	LARD STEARIN/LARD OIL/ETC NT EMULSIFIED OR PREPRD	KG	228,130	119,275
1505100000	WOOL GREASE, CRUDE	KG	10,847	21,760
1505900000	WOOL GREASE EX CRUDE & FATTY SUB STNCS INCL LANOLIN	KG	67,813	198,055
1506000000	ANIMAL FAT & OIL & FRACTION NESOI NT CHEM MODIFIED	KG	2,683,595	551,492
1507100000	SOYBEAN OIL & FRACTIONS, CRUDE, WHETH/NOT DEGUMMED	KG	458,597	210,533
1507904020	SOYBEAN OIL, ONCE-REFINED NOT CHEMICALLY MODIFIED	KG	192,1548	335,492
1507904050	SOYBEAN OIL, FULLY REFINED, NT CHEMICALLY MODIFIED	KG	12,489,395	12,883,709
1508900000	PEANUT (GROUND-NUT) OIL, REFINED, NT CHEM MODIFIED	KG	93,374	120,328
1509102000	OLIVE OIL, MARGIN, N/CHEM MODIFD, IN CONT <18 KG	KG	56,705	113,758
1509104000	OLIVE OIL, MARGIN, N/CHEM MODIFD, IN CONT 18KG/OVER	KG	183,069	216,110
1509902000	OLIVE OIL, REFINED, N/CHEM MODIFD, IN CONT <18 KG	KG	17,335	436,212
1509904000	OLIVE OIL, REFINED, N/CHEM MODIFD, IN CONT 18KG/OVER	KG	608	3,939
1512100020	SUNFLOWER-SEED OIL, CRUDE, NOT CHEMICALLY MODIFIED	KG	15,642	10,000
1512100040	SAFFLOWER OIL, CRUDE, NOT CHEMICALLY MODIFIED	KG	67,110	108,000

La tabla anterior muestra un ejemplo de la información suministrada por la Junta de Planificación, de las importaciones de grasas animales y aceites de Estados Unidos a Puerto Rico para el año fiscal 2001 [29].

Continuación de Anejo VI

TABLE - 2 IMPORTS INTO PUERTO RICO FROM FOREIGN COUNTRIES BY COMMODITY AND COUNTRY OF ORIGIN - FISCAL YEAR 2001				
COMMO CODE	DESCRIPTION AND COUNTRY	UNIT	QUANTITY	VALUE - \$
	ANIMAL OR VEGETABLE FATS AND OILS AND THEIR CLEAVAGE PRODUCTS; PREPARED EDIBLE FATS; ANIMAL OR VEGETABLE WAXES.....	TOTAL	4,268,775	8,157,905
150100002	LARD	KG	564,077	334,246
	CANADA.....		564,077	334,246
150410200	COD LIVER OIL & FRACTIONS NOT CHEMICALLY MODIFIED	KG	483	5,153
	DOMINICAN REPUBLIC.....		483	5,153
150910200	OLIVE OIL VIRGIN UNDER 18KG/CNTR NOT CHEM MODIFIED	KG	704,904	1,268,253
	ITALY.....		13,866	29,292
	POR TUGAL.....		1,237	3,060
	SPAIN.....		689,801	1,235,901
150910400	OLIVE OIL VIRGIN 18KG OR MORE/CNTR NT CHEM MODIFIED	KG	21,644	47,894
	SPAIN.....		6,444	27,031
	TURKEY.....		15,200	20,863
150990200	OLIVE OIL REFINED, UNDER 18KG WITH CNTR NT CHEM MOD	KG	2,429,101	5,900,283
	ITALY.....		7,273	14,003
	SPAIN.....		2,421,828	5,886,280
150990400	OLIVE OIL REFINED 18KG/MORE WITH CNTR NT CHEM MODIF	KG	1,089	3,785
	SPAIN.....		1,089	3,785
151000400	OLIVE RESIDUE OIL & BLENDS(1509&1510) EDIBLE <18KG	KG	161,736	184,138
	ITALY.....		153,499	172,104
	SPAIN.....		8,237	12,034

La tabla anterior muestra un ejemplo de la información suministrada por la Junta de Planificación, de las importaciones de grasas animales y aceites de países extranjeros a Puerto Rico para el año fiscal 2001 [29].

Anejo VII

Tablas de ingreso de arbitrios sobre productos de petróleo

 INGRESOS DE ARBITRIOS SOBRE PRODUCTOS DEL PETRÓLEO PETROLEUM PRODUCTS EXCISE TAXES REVENUES (EN MILES DE DÓLARES - IN THOUSANDS OF DOLLARS)				
AÑO FISCAL	PETRÓLEO CRUDO Y DERIVADOS	GASOLINA	COMBUSTIBLE DE AVIACIÓN	ACEITE DIESEL
FISCAL YEAR	CRUDE OIL AND DERIVED PRODUCTS	GASOLINE	JET FUEL	DIESEL OIL
1997	158,739	162,335	5,747	32,444
1998	171,636	173,387	6,172	36,101
1999	190,075	170,300	5,562	40,630
2000	144,786	170,319	4,689	42,165
2001	121,901	180,424	7,046	44,017
2002	158,619	175,617	5,095	37,856
2003	132,925	173,831	5,860	31,390
2004	115,300	183,566	4,934	26,768
2005	110,262	181,326	5,143	31,864
2006p	102,206	178,769	5,146	31,455

Fuente: Departamento de Hacienda / Department of Treasury
 Secretaría Auxiliar de Asuntos Económicos y Financieros / Office of Economic and Financial Affairs

La tabla anterior muestra la información suministrada por el Departamento de Hacienda, del ingreso de arbitrios sobre productos de petróleo en Puerto Rico [20].

Continuación de Anejo VII



**ARBITRIOS POR BARRIL DE PETROLEO CRUDO
CRUDE OIL EXCISE TAXES PER BARREL**

AÑOS FISCALES - FISCAL YEARS

MES	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	MONTH
JULIO	\$5	\$5	\$6	\$5	\$4	\$4	\$4	\$4	\$3	\$3	JULY
AGOSTO	\$5	\$5	\$6	\$5	\$3	\$4	\$4	\$3	\$3	\$3	AUGUST
SEPTIEMBRE	\$5	\$5	\$6	\$5	\$3	\$4	\$4	\$3	\$3	\$3	SEPTEMBER
OCTUBRE	\$5	\$5	\$6	\$5	\$3	\$4	\$4	\$3	\$3	\$3	OCTOBER
NOVIEMBRE	\$4	\$5	\$6	\$5	\$3	\$4	\$3	\$4	\$3	\$3	NOVEMBER
DICIEMBRE	\$5	\$5	\$6	\$5	\$3	\$5	\$3	\$3	\$3	\$3	DECEMBER
ENERO	\$6	\$5	\$6	\$4	\$3	\$5	\$4	\$3	\$3	\$3	JANUARY
FEBRERO	\$4	\$5	\$6	\$4	\$4	\$5	\$3	\$3	\$3	\$3	FEBRUARY
MARZO	\$5	\$6	\$6	\$4	\$4	\$5	\$3	\$3	\$3	\$3	MARCH
ABRIL	\$5	\$6	\$6	\$4	\$4	\$5	\$3	\$3	\$3	\$3	APRIL
MAYO	\$5	\$6	\$6	\$4	\$4	\$4	\$3	\$3	\$3	\$3	MAY
JUNIO	\$5	\$6	\$6	\$4	\$4	\$4	\$4	\$3	\$3	\$3	JUNE
Promedio	\$5	\$5	\$6	\$5	\$4	\$4	\$4	\$3	\$3	\$3	

Fuente: Departamento de Hacienda / Department of the Treasury

Oficina de Asuntos Económicos y Financieros / Office of Economic and Financial Affairs

La tabla anterior muestra la información suministrada por el Departamento de Hacienda, del arbitrio por barril de petróleo crudo en Puerto Rico [20].

Tabla de costos detallados de los vehículos

Numero de vehiculos Compañía	4					
Ganancia por galon recogido	\$ 0.10	\$/galon				
Meses al año	12	Meses/Año				
Dias laborables al mes	24	Días/Mes				
Minutos por hora	60	Minutos/Hora				
Tiempo de servicio por cliente	20	Aprox. Minutos/Cliente				
COSTOS POR VEHICULO			VEHICULO 1	VEHICULO 2	VEHICULO 3	VEHICULO 4
Capacidad del vehiculo	Galones		2,000	2,500	3,000	4,000
Velocidad del vehiculo	Millas/Hora		50	50	50	50
Horas de turno del conductor	Horas/Día		8	8	8	8
Horas extras por turno del conductor	Horas/Día					
Hora de almuerzo del conductor	Hora/Día		1	1	1	1
Costo por hora del chofer	Dólares/Hora		6	6	6	6
CF Sueldo conductor por dia	Dólares/Día		48	48	48	48
Horas disponibles por conductor	Horas/Día		7	7	7	7
Minutos disponibles por conductor	Minutos/Día		420	420	420	420
Millas recorridas por día aprox.	Millas/Día		350	350	350	350
Costo galón de diesel	Dólares/Galón		2	2	2	2
Galones por tanque	Galones/Tanque		25	30	45	50
Costo de tanquear el vehiculo	Dólares/Tanque		58	69	104	115
Millas recorridas por tanque	Aprox. Millas/Tanque		300	350	400	400
CV Costo por milla	Dólares/Milla		0.19	0.20	0.26	0.29
Cambio de Frenos	Dólares		300	300	300	300
Cada cuanto se cambian los frenos	Meses		12	12	12	12
Cambio de Frenos Diario	Dólares/Día		1.04	1.04	1.04	1.04
CV Cambio de frenos por milla	Dólares/Milla		0.003	0.003	0.003	0.003
Cambio de Gomas	Dólares		230	230	230	230
Cada cuanto se cambian las gomas	Meses		6	6	6	6
Cambio de Gomas Diario	Dólares/Día		1.60	1.60	1.60	1.60
CV Cambio de Gomas por millas	Dólares/Milla		0.005	0.005	0.005	0.005
Costo Cambio de Aceite	Dólares		60	60	60	60
Cada cuanto el cambio de aceite	Horas		150	150	150	150
CV Cambio de Aceite Diario	Dólares/Día		3.20	3.20	3.20	3.20
CV Cambio de Aceite por milla	Dólares/Milla		0.01	0.01	0.01	0.01
Aceite Mensual	Dólares/Mes		10	10	10	10
CV Aceite Diario	Dólares/Día		0.42	0.42	0.42	0.42
CV Aceite por milla	Dólares/Milla		0.001	0.001	0.001	0.001
Limpieza del vehiculo	Dólares/Semana		15	15	15	15
Limpieza del vehiculo por dia	Dólares/Día		2.50	2.50	2.50	2.50
CV Limpieza del vehiculo	Dólares/Milla		0.01	0.01	0.01	0.01
Costo de las mangueras	Dólares/Pie		5	5	5	5
Pies de manguera	Pies		5	5	5	5
Cada cuanto se cambian las mangueras	Meses		6	6	6	6
Cambio de Mangueras por dia	Dólares/Día		0.17	0.17	0.17	0.17
CV Cambio de Manueras por milla	Dólares/Milla		0.0005	0.0005	0.0005	0.0005

La tabla anterior detalla los costos por vehículo de acuerdo a su capacidad.