

**MODELO DE LOCALIZACIÓN Y RUTEO PARA EL TRANSPORTE DEL GAS
ASOCIADO A LA PRODUCCIÓN DE CRUDO EN CAMPOS PETROLEROS**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para obtener el título de

Magíster en Gerencia de Operaciones
(Modalidad de profundización)

Jorge Alexander Gutiérrez Güiza

Director

Andres Felipe Torres Ramos MSc.

Co-director

Lorena Silvana Reyes Rubiano MSc.

Universidad de La Sabana

Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas

Chía, Colombia

2018

Resumen: El gas asociado al petróleo es un recurso generado naturalmente durante la producción de crudo en los campos petroleros. Sin embargo, este gas es comúnmente quemado o simplemente liberado al ambiente por su bajo valor económico en comparación con el petróleo, además de la falta de inversión en proyectos que viabilicen su monetización. Teniendo en cuenta que el gas asociado es un recurso energético desperdiciado, y dado que en la actualidad se vienen gestando políticas dentro del marco global para disminuir las emisiones de este tipo, esta investigación tiene como fin determinar una propuesta de solución al problema de localización de plantas de procesamiento y transporte del gas asociado al petróleo, como medida de aprovechamiento del mismo. Para este fin, se ha consultado teoría científica actual relacionada al diseño de modelos matemáticos de optimización dentro del ámbito de la investigación de operaciones. Por último, con el fin de estimar los posibles impactos que una herramienta de este tipo podría generar en la industria, se realizan experimentos computacionales con información real de un campo petrolero colombiano.

Palabras clave: Localización, ruteo de vehículos, industria petrolera, gas asociado al petróleo.

Abstract: Associated petroleum gas is a natural resource generated during crude production in the petroleum fields. However, this gas is commonly flared or simply released into the environment because of its low economic value compared to petroleum's, besides the lack of investment in projects that enable its monetization. Considering that the associated gas is a wasted energy resource, and given that policies are currently being underway within the global framework that seek to lower the emissions of this type, this research aims to determine a solution to the problem of locating processing plants and vehicular transport for the associated petroleum gas, as a path for its exploitation. To achieve this goal, we have consulted current scientific theory related to the design of mathematical optimization models within the field of operations research. Finally, in order to estimate the possible impacts that a tool of this kind could generate in the industry, computational experiments are developed with real information of a Colombian oil field.

Keywords: Location, vehicle routing, Oil & Gas Industry, Transport, Associated petroleum gas.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	3
LISTADO DE TABLAS	5
LISTADO DE ILUSTRACIONES	7
GLOSARIO	8
ACRÓNIMOS	9
INTRODUCCIÓN	10
1.1. Propuesta de solución	11
1.2. Estructura del documento	11
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
2.1. Preguntas y objetivos de investigación	12
2.1.1. Preguntas	12
2.1.2. Objetivo General	12
2.1.3. Objetivos Específicos	12
2.2. Justificación y delimitación del estudio	12
2.3. Revisión de la literatura	13
2.3.1. Localización de Instalaciones	14
2.3.2. Ruteo de Vehículos	15
2.3.3. Localización y Ruteo de Vehículos	18
2.4. Conclusiones del capítulo	21
MODELO MATEMÁTICO DE PROGRAMACIÓN	22
3.1. Supuestos para la localización de instalaciones	23
3.2. Formulación del modelo matemático de programación lineal	24
3.3. Modelo Jerárquico de Localización y Ruteo de Vehículos	25
3.3.1. Etapa 1: Modelo de Localización	25
3.3.2. Etapa 2: Modelos de Ruteo	27
3.3.2.1. Modelo MDVRP	28
3.3.2.2. Modelo VRP	30
3.4. Conclusiones	32
RESULTADOS COMPUTACIONALES Y CASO DE ESTUDIO	34
4.1. Caso de Estudio	34
4.2. Ambiente Computacional	35
4.3. Escenario Base	35
4.4. Experimentación y resultados	36
4.4.1. Modelo de Localización	37
4.4.2. Modelos de Ruteo de Vehículos	42
4.4.2.1. Modelo MDVRP	42
4.4.2.2. Modelo VRP	44

4.4.3. Estimación Financiera	48
4.5. Conclusiones del caso de estudio	50
CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	52
5.1. Conclusiones	52
5.2. Perspectivas de Investigación.....	53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
ANEXOS.....	61
Anexo 1 Coordenadas X, Y de pozos campo Orito	61
Anexo 2 Matriz $a(k,i)$ asignación de vehículos a las plantas.	63
Anexo 3 Resultados modelo Localización	64
Anexo 4 Resultados modelo MDVRP	65
Anexo 5 Resultados modelos VRP	70

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de Algunos Trabajos Relacionados a la Localización de Instalaciones	15
Tabla 2 Clasificación de Algunos Trabajos Relacionados al Ruteo de Vehículos.....	17
Tabla 3 Clasificación de publicaciones LRP revisadas.....	20
Tabla 4 Matriz de asignación de vehículos	29
Tabla 5 Resumen de parámetros de modelamiento.....	36
Tabla 6 Sección de matriz de distancias [km] entre nodos, elaboración propia del autor.....	37
Tabla 7 Resultados Modelo de Localización, Plantas a Abrir	37
Tabla 8 Resultado modelo de localización: Resumen de resultados.....	41
Tabla 9 Configuración de las redes de transporte (Instancias 1 y 2).....	42
Tabla 10 Resultado modelo MDVRP: Desempeño de las soluciones.....	44
Tabla 11 Comparación resultados modelos de ruteo de vehículos.....	47
Tabla 12 Resumen de resultados de los modelos de localización y ruteo de vehículos	48
Tabla 13 Estimación de financiera del sistema de la solución propuesta.....	49
Tabla 14 Las coordenadas X y de los pozos fueron tomadas de la Agencia Nacional de Hidrocarburos - Colombia, (2016).....	61
Tabla 15 Matriz $a(k,i)$ asignación de vehículos a las plantas.....	63
Tabla 16 Resultados Modelo Localización Instancia 1	64
Tabla 17 Resultados Modelo de Localización Instancia 2	64
Tabla 18 Rutas generadas por el modelo de ruteo MDVRP. PLANTA ORITO 26. Variable $X(i,j,k)$ en la instancia 1.....	65
Tabla 19 Rutas generadas por el modelo de ruteo MDVRP. PLANTA ORITO 35. Variable $X(i,j,k)$ en la instancia 1.....	66
Tabla 20 Rutas generadas por el modelo de ruteo MDVRP. PLANTA ORITO 69. Variable $X(i,j,k)$ en la instancia 1.....	67
Tabla 21 Rutas generadas por el modelo de ruteo MDVRP. PLANTA ORITO 73. Variable $X(i,j,k)$ en la instancia 1.....	68

Tabla 22 Rutas generadas por el modelo de ruteo MDVRP. PLANTA ORITO 99. Variable $X(i,j,k)$ en la instancia 1.....	69
Tabla 23 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 26. Variable $X(i,j,k)$ en la instancia 1.....	70
Tabla 24 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 35. Variable $X(i,j,k)$ en la instancia 1.....	71
Tabla 25 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 69. Variable $X(i,j,k)$ en la instancia 1.....	72
Tabla 26 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 73. Variable $X(i,j,k)$ en la instancia 1.....	73
Tabla 27 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 99. Variable $X(i,j,k)$ en la instancia 1.....	74
Tabla 28 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 12. Variable $X(i,j,k)$ en la instancia 2.....	75
Tabla 29 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 31. Variable $X(i,j,k)$ en la instancia 2.....	76
Tabla 30 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 35. Variable $X(i,j,k)$ en la instancia 2.....	76
Tabla 31 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 47. Variable $X(i,j,k)$ en la instancia 2.....	77
Tabla 32 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 58. Variable $X(i,j,k)$ en la instancia 2.....	78
Tabla 33 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 71. Variable $X(i,j,k)$ en la instancia 2.....	78
Tabla 34 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 77. Variable $X(i,j,k)$ en la instancia 2.....	79
Tabla 35 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 91. Variable $X(i,j,k)$ en la instancia 2.....	79

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Clasificación de problemas LRP tomado de López et al., (2013).....	19
Ilustración 2 Propuesta Jerárquica de Modelamiento.....	22
Ilustración 3 Metodología general utilizada para los modelos propuestos.....	24
Ilustración 4 Campo Orito Putumayo, Colombia tomado de Universidad Nacional de Colombia, (2010).....	34
Ilustración 5 Distribución de pozos campo Orito 2015, elaborado por el autor.....	35
Ilustración 6 Resultado modelo de localización: Coordenadas de plantas a abrir.....	38
Ilustración 7 Resultado modelo de localización: Atención de pozos por planta (Instancia 1).....	39
Ilustración 8 Resultado modelo de localización: Atención de pozos por planta (Instancia 2).....	40
Ilustración 9 Estrategia de Abordaje al Caso de Estudio	41
Ilustración 10 Resultado modelo MDVRP: Rutas - Planta Orito 26.....	43
Ilustración 11 Resultado Modelo VRP Planta Orito 35 (Instancia 1)	45
Ilustración 12 Resultado Modelo VRP Planta Orito 35 (Instancia 2)	46
Ilustración 13 Análisis de Sensibilidad Flujo de Caja.....	50

GLOSARIO

Término	Significado
Pozo o clúster	Instrumento mecánico instalado para la producción de hidrocarburos en un campo petrolero.
Planta de procesamiento	de Refinería, que transforma el gas asociado al petróleo en productos terminados.
Gas asociado al petróleo	Recurso energético producido en simultáneo al momento de extraer el petróleo crudo de los campos petroleros.
TEA	Instrumento mecánico instalado en los pozos o clústeres que presentan gran cantidad de producción de gas asociado al petróleo y sirve para quemar controladamente dicho recurso.
Pie cúbico	Unidad de medida en volumen para los gases en la industria petrolera.
Galón	Unidad de medida en volumen para los líquidos en la industria petrolera.
Barril	Unidad de medida en volumen para los líquidos en la industria petrolera, equivalente a 42 galones.

ACRÓNIMOS

ALNS	Búsqueda adaptativa de gran vecindario
ACO	Optimización de Colonia de Hormigas
B&P&C	Branch and price and cut.
CLRPMB	Problema de localización y ruteo de vehículos con flota mixta
CVRP	Problema de ruteo con restricción de capacidad
ELS	Algoritmo de búsqueda Local Evolucionaria
GA	Algoritmo genético.
GAP	Gas asociado al petróleo
GLP	Gas licuado del petróleo
GNV	Gas natural vehicular
GPP	Planta de procesamiento de gas
GVTNS	Búsqueda tabú granular de vecindario variable
LARP	Problema de localización y ruteo en arco
LP	Programación Lineal
LRP	Problema de localización y ruteo
MA	Algoritmo memético
MDLNS	Algoritmo de búsqueda de gran vecindario multidireccional
MRU	Micro Refinery Unit
NS	Búsqueda de vecindario
VRP	Problema de ruteo de vehículos
MDVRP	Problema de ruteo de vehículos con múltiple depósito

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El Gas Asociado al Petróleo (GAP) presente durante la extracción del petróleo es un gas combustible con uso industrial. Sin embargo, debido a su bajo valor comercial y bajos volúmenes de producción no es atractivo dentro de los campos donde se explota el petróleo crudo, por esta razón es común encontrar campos petroleros en donde este gas es quemado o simplemente liberado al ambiente, lo cual conlleva a un no aprovechamiento del recurso y un problema ambiental Rajović, Kiss, Maravić, y Bera, (2016). El actual auge ambientalista ha impulsado el interés de los grandes productores respecto al desarrollo de nuevos métodos para disminuir el impacto generado por el GAP, prueba de esto son los avances en sistemas de captación y utilización de este recurso. A pesar de esto, el costo del transporte ha sido limitante de la viabilidad de muchos proyectos relacionados. No obstante, mediante la aplicación de herramientas logísticas es posible determinar la localización de plantas de procesamiento o transformación de GAP dentro de los campos petroleros y diseñar redes de transporte vehicular que permitan conectar los puntos de producción con esos centros de utilización o transformación de este recurso. (Rodina, 2016)

Dado que la industria petrolera es hasta el momento el principal pilar de la economía colombiana, es fácil encontrar ejemplos de quema y liberación de GAP en los campos petroleros del país. De acuerdo con información del Seminario Regional del Gas de 2015 realizado por el BANCO MUNDIAL (The World Bank, 2015), se estima que durante el periodo comprendido entre los años 1995 y 2006, en Colombia se quemaron al año en promedio 0,4 Billones de Metros Cúbicos (BMC) de GAP. En adición, mediante información satelital se determinó que la mayor concentración de Teas (antorchas que queman el gas) en Colombia se encuentra en los campos del Meta y Casanare aportando el 50% del gas quemado nacionalmente Elvidge et al., (2007). Así mismo, la producción nacional de petróleo se duplicó desde ese entonces aumentando inherentemente la producción de gas asociado al petróleo liberado o quemado en Colombia. (Unidad de Planeación Minero Energética, 2016)

En relación con los beneficios del aprovechamiento de GAP, no solo se impactan el aspecto ambiental, además de esto, se constituyen resultados desde lo económico y lo social debido a que se reduce la dependencia de combustibles líquidos usados industrial y residencialmente, gracias a que las plantas de proceso pueden transformar el GAP en Gas Licuado del Petróleo comercial (GLP) y otros subproductos combustibles como Diésel y Gas Natural Vehicular (GNV). La selección del mecanismo apropiado de aprovechamiento del GAP depende de los volúmenes en los que sea producido. Por ejemplo, un campo que produce GAP entre 0 – 0,5 Billones de Metros Cúbicos/año (BMC/año), tiene suficiente GAP para ser transformado en plantas de procesamiento de gas (GPP) y así producir combustibles y otros derivados PFC Energy, (2007). Dicho en otras palabras, un campo con estas características tiene potencial para ser energéticamente autosuficiente, debido a que esos niveles de producción de gas serían suficientes para generar la energía eléctrica que necesita una compañía petrolera para operar. Por tal motivo, se considera que la producción de GAP de ciertos campos petroleros en Colombia sería suficiente para aplicar la tecnología GPP.

De acuerdo a lo anterior, la cantidad de GAP producido en un área definida determina en el número de plantas GPP a utilizar. Sin embargo, se debe diseñar una red logística que permita localizar las plantas de procesamiento y generar las rutas de los vehículos que transportan el gas desde los pozos petroleros o clústeres hasta cada una de esas plantas de GPP, teniendo en cuenta

que, tanto la localización de las plantas, como la definición de las rutas deberá buscar el mínimo costo de operación del sistema.

Por estas razones, es necesario determinar herramientas formales para la optimización de la localización de los distintos centros de procesamiento del gas, y de acuerdo a ello posteriormente definir las rutas de los vehículos que transportarán el GAP hasta cada una de estas estaciones de procesamiento, buscando minimizar los costos del sistema. Según la evidencia científica actual, existen dos problemas logísticos que se ajustan a este caso: el problema de la localización de instalaciones (Facility Location Problem - FLP) para determinar la óptima ubicación de los centros de aprovechamiento GPP, y el ruteo de vehículos (Vehicle Routing Problem - VRP) que garantiza el suministro del recurso a cada una de las Plantas de Procesamiento (Puntos de suministro) buscando el mínimo costo de transporte. (Prodhon y Prins, 2014)

1.1. Propuesta de solución

El presente trabajo se enfoca en determinar una herramienta para el tomador de decisiones en las compañías operadoras de campos petroleros, que permita diseñar la conformación de una red de plantas de procesamiento de gas asociado al petróleo junto con la planeación de rutas de recolección y transporte del GAP para ser procesado en cada una de ellas. Para esto se hace uso de modelos matemáticos que representan el problema y permiten dar solución al mismo. El estudio de la localización de instalaciones, junto con el problema de ruteo de vehículos dan paso a la formulación de lo que hoy en día se conoce como el problema de localización y ruteo LRP (Location Routing Problem).

La caracterización del problema se realiza mediante dos modelos de programación lineal entera mixta, los cuales facilitan las operaciones de selección de localizaciones de plantas de procesamiento y ruteo de vehículos transportadores de GAP, minimizando el costo total de operación como único objetivo.

Posteriormente se llevará a cabo el análisis en un ambiente industrial del problema considerando la operación real de un campo petrolero con gran cantidad de producción de GAP en Colombia, para lo cual se acude a información fiscalizada por la Agencia Nacional de Hidrocarburos.

1.2. Estructura del documento

El esquema del documento es el siguiente. El capítulo 2 presenta el planteamiento del problema, es allí donde se determinan las preguntas y objetivos de la investigación, la justificación y delimitaciones del estudio y una revisión del estado del arte para el problema de localización y ruteo. El capítulo 3 presenta los modelos matemáticos de localización y ruteo. El capítulo 4 muestra el caso aplicado junto a los resultados obtenidos. Finalmente, las conclusiones y perspectivas de investigaciones se presentan en el capítulo 5.

CAPÍTULO 2

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Preguntas y objetivos de investigación

2.1.1. Preguntas

Este proyecto busca vincular los estudios sobre modelos de ruteo con métodos de localización que propendan el diseño de una red logística adecuada, que permita recuperar gran parte del gas generado durante la producción petrolera para resolver la siguiente pregunta ¿Cómo solucionar el problema de localización de las plantas de procesamiento y ruteo de vehículos para el transporte de gas asociado al petróleo empleando métodos matemáticos?

Adicionalmente se busca dar solución a las siguientes preguntas específicas:

¿Cuáles son los factores a considerar en la definición de la ubicación de los centros de procesamiento y el transporte de GAP?

¿Cómo resolver el problema de forma eficiente?

¿Cómo resolver el problema a nivel industrial?

¿Cuál podría ser el beneficio económico a partir del GAP captado?

2.1.2. Objetivo General

Definir un modelo matemático que permita la localización de plantas de procesamiento y el ruteo de gas asociado al petróleo (GPP) para un campo petrolero en Colombia.

2.1.3. Objetivos Específicos

- Caracterizar los factores y limitantes que influyen en la localización de centros de procesamiento (GPP) y el ruteo de vehículos para el suministro de Gas Asociado al Petróleo (GAP).
- Determinar un modelo matemático que permita definir la red logística de rutas de recolección del gas captado por actividades petroleras.
- Evaluar el modelo para el caso aplicado al campo Orito en Colombia.
- Cuantificar los volúmenes de GAP que serían captados dentro del sistema de estudio y estimar sus beneficios asociados.

2.2. Justificación y delimitación del estudio

El gas asociado a la producción petrolera es un recurso poco aprovechado hasta el momento debido a que es mayormente quemado o liberado al ambiente por falta de infraestructura y esquemas regulatorios que hagan atractiva su utilización. Con base en esto, algunos de los principales países productores de petróleo como Canadá se comprometieron durante el protocolo de Kioto con promover el uso del GAP desde sus marcos legales The World Bank, (2016). Por su

parte, el Ministerio de Minas y Energía colombiano ha expuesto en el Plan Indicativo de Abastecimiento de Gas Natural (2015), la necesidad de diversificar las fuentes de suministro de gas natural en Colombia, debido a que se prevé que el país experimente un déficit de producción de energía con respecto a la demanda estimada para el año 2023 de 0,4 Giga British Thermal Units por Día (GBTUD). Según esto, se ha puesto en consideración incluir fuentes energéticas no convencionales como el GAP para abastecer de gas combustible tanto a la industria como al sector residencial, y también, garantizar la confiabilidad en el sector energético nacional. (Unidad de Planeación Minero Energética, 2015a)

En la misma línea, Tan & Barton, (2015) proponen como alternativa para aprovechar el GAP, reducir costos de inversión rompiendo el estándar existente de construir gasoductos para el transporte del recurso, todo esto, a través del diseño de modelos de localización para desplegar plantas móviles que realicen el proceso de GTL (gas to liquids) o LNG (gas natural licuado) a pequeña escala. Mostrando como resultado una ruta atractiva a la monetización del GAP gracias a un esquema de optimización multiperiodo que determina dinámicamente la mejor localización para estos activos dentro de un campo petrolero. Permitiendo a su vez, aportar flexibilidad a los sistemas de producción y transporte de hidrocarburos, área donde usualmente se impactan en mayor medida los costos de las compañías debido a la rigidez y estaticidad de los gasoductos y oleoductos.

Ahora bien, el propósito de este proyecto es diseñar dos modelos de recolección del GAP, para a partir de ellos identificar la mejor forma de abordar el problema de reducir los costos en un sistema de aprovechamiento de GAP, lo cual implicaría un impacto ambiental positivo a la operación de la industria petrolera. Esto involucra determinar la localización estratégica de una o varias Plantas de Procesamiento de Gas en un campo petrolero, y posteriormente diseñar el ruteo de la flota de vehículos que se encargarán de recolectar el gas asociado al petróleo producido en los pozos existentes del campo y transportarlo a las plantas de procesamiento. Este modelo será estudiado en el campo Orito ubicado en el departamento del Putumayo en Colombia, debido a que actualmente produce una cantidad significativa de gas asociado al petróleo durante su operación normal. Todo esto buscará obtener un esquema de localización de puntos de procesamiento y rutas de distribución vehicular del gas que apoyen la estrategia nacional de suministro de gas y disminución de las emisiones de gas efecto invernadero.

En pocas palabras, un estudio de este tipo puede representar en primera instancia un ahorro que se verá reflejado en la reducción de los costos en las operaciones del campo, en parte porque una fracción de su demanda de combustibles sería cubierta a través de la transformación del GAP en combustibles líquidos, y adicionalmente, se podría generar un ingreso económico que alivie en cierta medida malestares causados por la crisis petrolera como el corte parcial y temporal de la producción en campos nacionales. Así pues, el diseño de un modelo que minimice los costos involucrados en el transporte del Gas Asociado para abastecer una o varias plantas de procesamiento que puedan aprovechar el gas para producir combustibles sería fundamental para afrontar los recientes periodos de crisis petrolera que han desestabilizado la autonomía energética del país. (Unidad de Planeación Minero Energética, 2015a)

2.3. Revisión de la literatura

Dentro de las corrientes de investigación del campo logístico, se han venido popularizando durante los últimos años el estudio de problemas relacionados a la localización de instalaciones y el

ruteo de vehículos. Para tener un acercamiento al interés de la academia hacia estos temas, se revisaron 84 publicaciones científicas.

2.3.1. Localización de Instalaciones

Como lo han mostrado Aliabadi & Shamekhi (2012), la aplicación de gasoductos para transportar gas es eficiente entre distancias cortas entre 0 a 2000 km, y volúmenes de producción puntuales (por pozo o cluster) que ascienden al orden de 4.8 millones de pies cúbicos al día. Por esta razón, el GAP presenta un reto para ser monetizado debido a que su bajo volumen de producción por unidad de área genera que los costos asociados a la construcción de gasoductos que sirvan de plataforma de transporte sean ineficientes, aparte de la falta de infraestructura de aprovechamiento y refinación.

Este efecto indeseado se ha visto potenciado debido a que tradicionalmente la industria petrolera se ha asociado con la inversión en infraestructura de gran escala. Así mismo, operar a grandes escalas permite a las compañías operadoras disfrutar de los beneficios de las economías de volumen, sin embargo, el problema es que la gran inversión requerida ralentiza y descalifica muchos proyectos que involucran el GAP. Por razones como estas se han desarrollado modelos de optimización que determinen la localización de plantas GPP móviles que requieran de inversiones menores a las convencionales y pueden ser relocalizadas cada cierto tiempo dentro de un campo petrolero, todo esto con el ánimo de disminuir los costos de inversión e incrementar la factibilidad de muchos proyectos de aprovechamiento de GAP. (Tan y Barton, 2015)

Cabe señalar que la formulación de la función objetivo en los modelos de localización de instalaciones representa el gran diferenciador entre ellos. Se puede considerar que los objetivos principales son; “The median objective”, que busca minimizar el costo total de satisfacer los requerimientos de los clientes que son atendidos; “The center objective”, enfocado en minimizar el máximo costo de satisfacer la demanda de un cliente, desde un grupo de sitios elegidos, sobre todos los clientes; Por último, “The centroid” objective, cuyo objetivo es la combinación de los dos anteriores. Ya que el caso de estudio de este proyecto tiene como contexto la operación de una compañía petrolera, se abordará el problema desde una perspectiva holística, por lo tanto, la función objetivo buscará ahorrar el costo total de recolectar las producciones de GAP de todos los pozos o clústeres existentes en el área evaluada. Es decir, que se buscará la solución desde un acercamiento tipo “The median objective”. (Marín, Nickel, Puerto, y Velten, 2009)

Simultáneamente, la principal tarea de un ingeniero de petróleos es desarrollar un esquema para producir tantos hidrocarburos como sea posible dentro de límites de viabilidad económica y técnica. Por ende, si tenemos en cuenta que “Una pobre localización de instalaciones desprenderá inconvenientes y retos en el abastecimiento y distribución de productos” Li, Hu, y Wright, (2015). La definición acertada de la cantidad, capacidad y localización de instalaciones de producción hace parte importante de estos esquemas de desarrollo en donde la solución es comúnmente derivada de factores como la infraestructura instalada y los aspectos geológicos de cada campo. Cabe señalar que, las utilidades esperadas son el principal factor evaluador de los esquemas de desarrollo de un campo petrolero, conociendo esto, es posible generar algoritmos matemáticos de minimización o maximización para decidir sobre alternativas de inversión en los proyectos de desarrollo. Ejemplo de esto es el caso presentado por Al-Mudhafar, Al-Jawad, y Al-Shamma, (2010) quienes aplicaron un algoritmo genético para encontrar solución al problema de localización de pozos productores dentro de un campo petrolero con la cantidad máxima de utilidades.

La tabla Número 1 no solo pretende mostrar los principales objetivos de la localización, sino que también permite identificar cuáles son las principales características a considerar en un modelo de localización. Usualmente los problemas de localización están condicionados por factores como decisiones de establecer múltiples instalaciones o localización temporal de las mismas.

Tabla 1 Clasificación de Algunos Trabajos Relacionados a la Localización de Instalaciones

Año	Autor	Metodología	Objetivo			Características				
			B	C	D	CAP	MC	FLP	MF	LD
2009	Jinfeng Li, Feng Chu, Christian Prins Institute	Tabu - Heurística	x			x	x	x		
2009	Alfredo Marina, Stefan Nickel, Justo Puerto, Sebastian Velten	B&C - Heurística	x					x		x
2009	Roger Rocha, Ignacio E. Grossmann, Marcus V.S. Poggi de Aragã	NS - Heurística	X					X		
2010	Wathiq J. Al-Mudhafar, Mohammed S. Al-Jawad, Dunia A. Al-Shamma	Algoritmo Genético - Heurística		x				x		x
2014	Davood Shishebori y Iman Dayarian y Armin Jabbarzadeh y Farnaz Barzinpour	Tabu - Heurística	x					x	x	
2015	Yihua Li, Guiping Hu, Mark Mba Wright	Exact - MIP		x				x		
2015	Siah Hong Tan, Paul I. Barton	B&C - Heurística		x				x		
2016	Rafael Blanquero, Emilio Carrizosa, Boglárka G.-Tóth, Amaya Nogales-Gómez	B&B - Heurística			x			x		

B&C= Branch and Cut. B&B= Branch and Bound. NS= Búsqueda de vecindario. B= Minimizar Costo. C= Maximizar Utilidad. D= Maximizar Servicio. CAP= Capacidad restringida. MC= Multi Producto. FLP= Localización de Instalaciones. MF= Múltiples Instalaciones. LD= Localización Discreta.

No obstante, la literatura del campo logístico aplicada a operaciones petroleras es escasa y presenta una gran oportunidad de investigación por desarrollar, es por esto que a pesar de que existe la necesidad de optimizar (minimizar o maximizar) costos o utilidades, sea común encontrar que aún hoy en día existan compañías petroleras que realicen este tipo de planes de desarrollo manualmente. En contraste, existen pocos modelos como el presentado por Rocha, Grossmann, y Poggi de Aragã, (2009) que se basaron en una metodología heurística de local branching para resolver instancias de tipo industrial “Oil & Gas” en los que por medio de formulaciones exactas no se ha logrado obtener soluciones factibles en tiempos menores a una semana de computación.

2.3.2. Ruteo de Vehículos.

Estudios previos aplicados a la industria “Oil & Gas” se enfocan de optimizar problemas de ruteo relacionados al transporte de personal por medio de flota helicoportada Rosa, Machado, Ribeiro, y Mauri, (2016), ruteo de barcasas de suministro de combustible Fiorot, Alvarenga, y Rosa, (2016), ruteo de producción a través de oleoductos y gasoductos Gao, He, y You, (2017) y distribución de combustibles líquidos Yildiz, Arslan, y Karaşan, (2016). A raíz de ello existen ejemplos de algoritmos heurísticos que demuestran potencial significativo para el desarrollo futuro de aplicaciones enfocadas a resolver instancias con amplios rangos de complejidad como el ruteo con

restricción de capacidad (Capacitated Vehicle Routing Problem CVRP). Y otros problemas de optimización discreta y continua (Wood, 2016).

Fiorot, Alvarenga, y Rosa (2016). Muestran como en las operaciones de suministro de combustible es común encontrar la necesidad de que la flota de vehículos deba realizar paradas intermedias entre clientes para reabastecer su carga de combustible y de esta forma se cumpla con la demanda de la totalidad de los mismos. Por esto existen modelos de ruteo de vehículos con instalaciones de reabastecimiento intermedias (Vehicle Routing Problem with Intermediate Replenishment Facilities – VRPIRF). Esto es importante sobre todo cuando las distancias entre clientes y depósitos son grandes, de esta manera se evita que los vehículos viajen largas distancias para volver desde los depósitos hasta la zona de los clientes. Por último, Fiorot et al., (2016) probaron que tener más puntos de reabastecimiento puede llevar a tener menores costos de transporte. Por otra parte, contar con flotas homogéneas así sea de pequeña o gran capacidad no es aconsejable ya que esto acarrea costos logísticos altos. Adicionalmente, destacan que para instancias de carácter industrial es recomendado aplicar metodologías heurísticas debido a que este tipo de problema es considerado NP-Hard y los optimizadores comerciales no son capaces de encontrar soluciones óptimas.

Cabe señalar que, si bien no se conocen modelos aplicados al ruteo de vehículos para el transporte de GAP dentro de los campos petroleros, si es conocido en el sector “Oil & Gas” un problema de ruteo análogo conocido como el problema de ruteo de personal para el mantenimiento de pozos productores. Un aspecto particular de este tipo de problema, es la existencia del costo generado a raíz de no atender los pozos a tiempo, este costo se ve reflejado en la pérdida momentánea de producción hasta que el pozo es atendido. Este factor se podría homologar de tal manera que se considere cuantificar el volumen de GAP quemado o liberado al ambiente desde que se alcanza almacenamiento máximo de los pozos o clústeres hasta que los mismos sean atendidos por la flota de vehículos. Por otra parte, para solucionar este tipo de problema, se han formulado esquemas matemáticos de programación entera mixta (Mixed-Integer Linear Program MILP) que buscan minimizar el costo global que incluye costos de transporte, mantenimiento y pérdidas por demora en atención de los pozos. (López, Akhavan, Dieulle, Labadie, y Medaglia, 2016) La tabla Número 2 no solo pretende mostrar los principales objetivos de los modelos de ruteo, sino que también permite identificar cuáles son las principales características a considerar en un modelo de ruteo. Usualmente los problemas de localización están condicionados por factores como decisiones de establecer el riesgo asociado a la operación.

Tabla 2 Clasificación de Algunos Trabajos Relacionados al Ruteo de Vehículos

Año	Autor	Metodología	Objetivos						
			B	C	D	BR	MR	ME	MT
2011	C. E. Torres Pérez, E. Olivares-Benítez, J. L. Martínez Flores	Heurística	x						
2011	Caroline Prodhon	ELS	x						
2011	Jørgen Glomvik Rakke, Magnus Stålhane, Christian Rørholt Moea, Marielle Christiansen, Henrik Andersson, Kjetil Fagerholt, Inge Norstad	Heurística		x					
2012	Ahlem Chbichib, Racem Mellouli, Habib Chabchoub	VDNS		x					
2012	Paweł Hanczar	CG	x						
2013	Koushik Venkata Narasimha, Elad Kivelevitch, Balaji Sharmaa, Manish Kumar	Ant			x				
2014	Said Salhi, Arif Imran, Niaz A. Wassan	VNS	x						
2014	Belov Alexander, Slastnikov Sergey	Ant			x				
2015	Attila A. Kovacs, Sophie N. Parragh, Richard F. Hartl	MDLNS	x			x			
2015	Jianghua Zhang, Yingxue Zhao, Weili Xue, Jin Li	Tabu	x						
2015	Atiq W. Siddiqui, Manish Verma	Exact	x				x		
2015	Noraini Mohd Razali	GA			x				
2015	Taofeek Biobakua, Gino Lima, Jaeyoung Cho, Hamid Parsaeib, Seonjin Kim	Risk	x						
2016	V. N. Coelho, A. Gragas, H. Ramalinho, I.M.Coelho, M.J.F.Souza, R.C. Cruza	ILS; GRASP; VNS	x						
2016	Eliana M. Toro-Ocampo, Andrés H. Domínguez- Castaño, Antonio H. Escobar-Zuluaga	ILS			x				
2016	Iliya Markova, Sacha Varone, Michel Bierlaire	MNS	x						
2016	Jiani Qian, Richard Eglese	CG						x	
2016	Henrique Fiorot Astoures, Rodrigo de Alvarenga Rosa, André Luís da Silva Rosa	Exact	x						
2016	Eduyn López-Santana, Raha Akhavan-Tabatabaei, Laurence Dieulle, Nacima Labadie, Andrés L. Medaglia	Exact	x						
2016	David A. Wood DWA	MA			x				
2016	Davide Anghinolfi, Massimo Paolucci, Flavio Tonelli	VNS				x			x
2016	Florent Hernandez, Dominique Feillet, Rodolphe Giroudeau, Olivier Naud	B&P	x						
2017	Eirik Fernández Cuesta, Henrik Anderssona, Kjetil Fagerholta, Gilbert Laporte	ALNS	x						

ELS= Búsqueda Local Evolucionaria. VDNS= Búsqueda variable descendente de vecindario. CG= Generación de Columna. Ant= Colonia de Hormigas. MDLNS= Búsqueda de gran vecindario multidireccional. GA = Algoritmo Genético. Risk= Análisis de riesgos. ILS= Búsqueda local iterada. GRASP= Procedimiento de Búsqueda Adaptable Aleatorizado y Codicioso. VNS= Búsqueda Variable de Vecindario. MNS= Búsqueda Múltiple de Vecindario. MA = Algoritmo Memético. B&P= Ramificación y Precio. ALNS= Búsqueda adaptativa de gran vecindario. B= Minimizar Costo. C= Maximizar Utilidad. D= Minimizar Distancia Recorrida. BR= Balancear Rutas. MR= Minimizar Riesgo. ME= Minimizar Emisiones. MT= Minimizar Tiempo.

2.3.3. Localización y Ruteo de Vehículos.

Como su nombre sugiere, los modelos LRP buscan facilitar la toma de decisiones de localización de instalaciones como plantas, depósitos etc. integrando decisiones de ruteo de vehículos que de otro modo, al ser estudiadas por separado, arrojarían resultados sub óptimos Drexl y Schneider (2015). Cabe señalar que, en la vida real son escasos los problemas que se plantean con un único objetivo de los cuales la mayoría busca minimizar el costo, Por el contrario, es típico encontrar problemas multiobjetivo en los que no solo se busca minimizar el costo, sino que otros objetivos considerados son: Minimizar el riesgo, balancear las cargas de trabajo, gestionar inventario, etc. (Martínez, Molina, Ángel, Gómez, y Caballero, 2014)

Para conocer desde una perspectiva taxonómica los problemas de localización y ruteo se revisó el artículo publicado por López, Ferreira, Santos, y Barreto (2013). En su artículo se describen las principales y más populares aplicaciones de modelos de localización y ruteo dentro de los cuales, debido a su pertinencia se hace énfasis, Primero, en el problema de localización y ruteo con capacidad restringida (Capacitated Location Routing Problem CLRP) cuya única restricción en el ruteo es la capacidad de carga de los vehículos Escobar, Linfati, Baldoquin, y Toth, (2014). Segundo, en el problema de localización y ruteo en arco de vehículos (Location Arc Routing Problem LARP) en el cual los clientes dejan de ser nodos y se convierten en arcos de demanda u oferta, este tipo de problema se encuentra en las industrias de recolección de basuras, mantenimiento de vías etc. (Riquelme, Gamache, y Langevin, 2016)

Por su parte, Escobar et al. (2014) propusieron una variante heurística para resolver este tipo de problemas al cual bautizaron Granular Variable Tabu Neighborhood Search (GVTNS). Los resultados de dicho algoritmo fueron comparados en un grupo de instancias expuestas en la literatura actual, demostrando un mejor desempeño al encontrar los resultados óptimos en tiempos de computación más rápidos. Sin embargo, aunque existen un número significativo de publicaciones relacionadas a este tema, es deficiente el volumen de publicaciones a nivel comprensivo que faciliten la comparación entre la calidad de los métodos de solución. Por lo tanto, no existe al momento alguna conclusión sobre la efectividad de cualquiera de los métodos comúnmente utilizados. (López et al., 2016) La ilustración número 1 presenta una clasificación de los tipos de planteamiento LRP presentados por Lopes et al., (2013).

Prodhon y Prins (2014) proponen una categorización de los modelos de solución como exactos, heurísticos y metaheurísticos. Por otra parte, se ha probado como gracias a metodologías heurísticas se pueden obtener soluciones robustas y efectivas para LRP con instancias de más de 100 nodos de demanda en tiempos menores a una semana de computación. (Fazel Zarandi, Hemmati, Davari, y Burhan Turksen, 2013)

Por otra parte, cabe resaltar que la operación de todas las industrias se ve afectada en distinta medida cuando la variabilidad se hace presente debido a la constante exposición a los diferentes tipos de disrupción que existen en los sistemas. Es por esto que la gestión y medición del riesgo son importantes cuando la meta es minimizar los costos, según esto, sería acertado incluir este aspecto a la toma de decisiones de localización y ruteo para sistemas expuestos a disrupciones inherentes al transporte y producción de materiales peligrosos (Hazmat), exposición a desastres naturales, ataques terroristas y crisis financieras Ahmadi y Seddighi, (2013). Ahora bien, dependiendo de las necesidades del decisor, se encuentra que en los modelos Hazmat y de gestión del riesgo, la ruta más corta o de menor costo operativo no necesariamente serán la opción más apetecida, todo esto

porque el factor riesgo suele generar dilemas entre los distintos objetivos de minimización (Costo, distancia, tiempo, exposición, impacto ambiental, pólizas de seguros, etc) Biobaku, Lim, Cho, Parsaei, y Kim, (2015), Zhao y Verter, (2015), Siddiqui y Verma, (2015).

Como hemos visto, a diferencia de nuestra meta, los modelos Hazmat y de gestión del riesgo pretenden minimizar impactos, riesgos y evitar la exposición de regiones con alta población Samanlioglu, (2013). Esta investigación se enfocará en construir un modelo de localización y ruteo que minimice los costos para la operación dentro de un campo petrolero en donde en efecto y no considerará la existencia del factor riesgo relacionado a su operación.

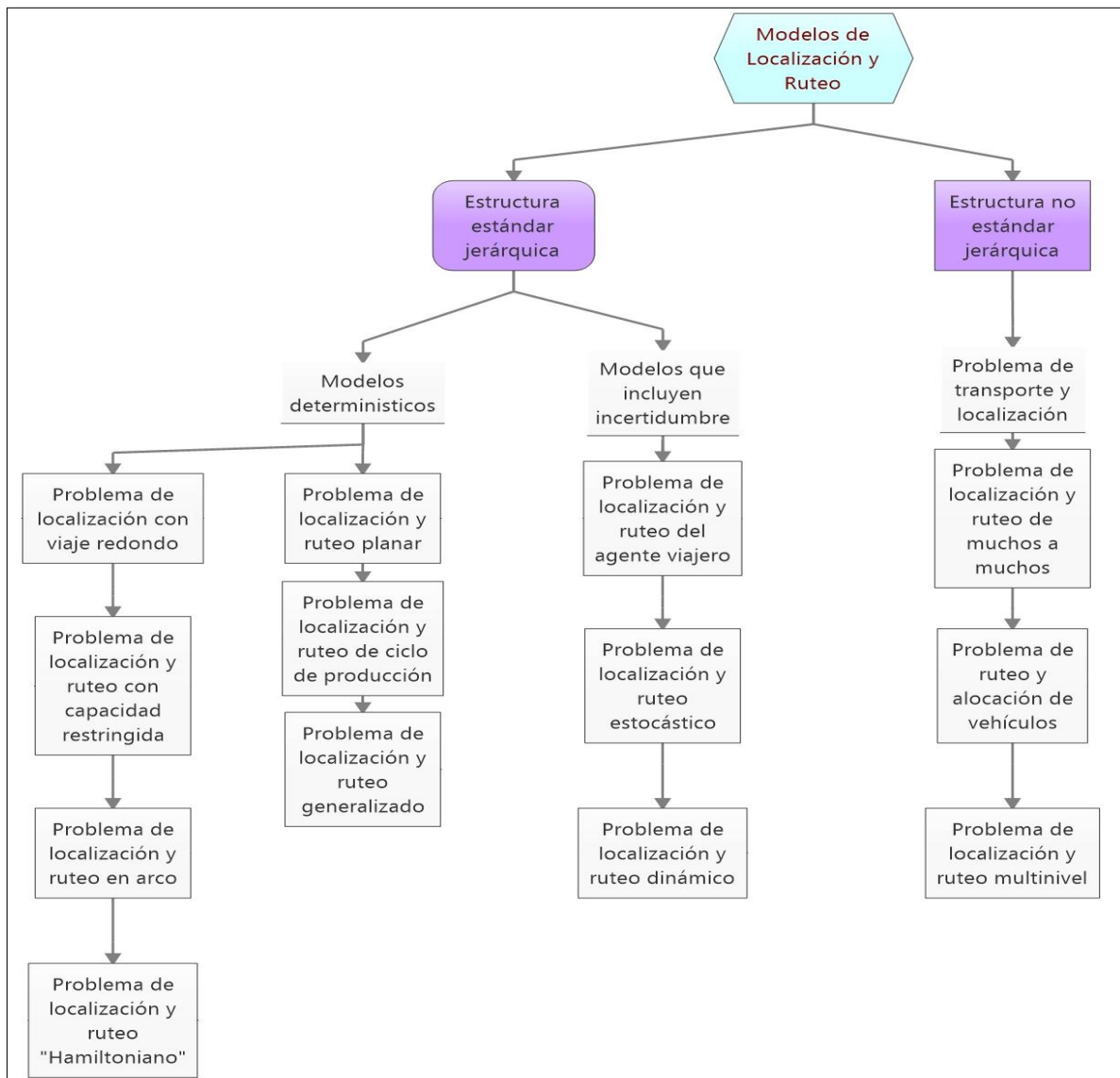


Ilustración 1 Clasificación de problemas LRP tomado de López et al., (2013)

A continuación, se presenta una clasificación de los artículos revisados según su metodología y función objetivo.

Tabla 3 Clasificación de publicaciones LRP revisadas.

Año	Autor	Característica	Metodología	Objetivos									
				B	C	D	E	BR	MR	ME	MT		
2016	Çağrı Koç	PLRP	ALNS	x									
2016	Shangce Gao, Yirui Wang, JiuJun Cheng, Yasuhiro Inazumi, Zheng Tang	DLRP	ACO	x									
2016	Juan Pablo Riquelme-Rodríguez, Michel Gamachea, André Langevin	LARP	Heurístico	x									
2016	Renan Tunalıoğlu, Çağrı Koç and Tolga Bektaş	LRP	LNS	x									
2015	Jiahong Zhao, Vedat Verter	LRP	MILP	x						x			
2015	Ismail Karaoglan, Fulya Altıparmak	CLRPMB	MA	x									
2016	A. Bozorgi-Amiri, M. Khorsi	DMLRP	MILP	x			x						x
2014	John Willmer Escobar, Rodrigo Linfati, Maria G. Baldoquin, Paolo Toth	CLRP	Tabú	x									
2014	Iris Abril Martínez-Salazar, Julian Molina, Francisco Ángel-Bello, Trinidad Gómez, Rafael Caballero	TLRP	Tabú; GA	x					x				
2014	Rodrigo Linfati, John Willmer Escobar y Gustavo Gatica	LRPH	Tabú	x									
2014	Rui Borges Lopez, Frank Plastria, Carlos Ferreira, Beatriz Sousa Santos	LARP	Tabú; ALNS; LS; GRASP	x									
2014	Inmaculada Rodríguez-Martín, Juan-José Salazar-González, Hande Yaman	HLRP	B&C	x									
2014	Julia Rieck, Carsten Ehrenberg, Jürgen Zimmermann	MMLRP	GA	x									
2013	Amir Ahmadi-Javid, Amir Hossein Seddighi	LRP	SA	x									
2013	Mohammad Hossein Fazel Zarandi, Ahmad Hemmatia, Soheil Davari, I. Burhan Turksen	LRPTW	SA			x							
2013	Funda Samanlıoğlu	LRP	MIP	x									
2013	S. Meysam Mousavi, Reza Tavakkoli-Moghaddam	LRP	HSA; Tabú;	x									
2013	Seyed Hossein Hashemi Doulabi, Abbas Seifi Department	LARP	SA	x									
2013	Ching-Jung Ting, Chia-Ho Chen	CLRP	ACO	x									
2013	Ricardo Saraiva de Camargo, Gilberto de Miranda, Arne Løkketangen	MMHLRP	MIP	x									
2013	W.J. Guerrero, C. Prodron, N. Velasco, C.A. Amaya	ILRP	LS	x									
2012	João Coutinho-Rodrigues, Lino Tralhão, Luís Alçada-Almeida	LRP	MILP			x				x			
2012	Peng-Sheng Youa, Yi-Chih Hsieh	LRP	GA	x									
2012	Ismail Karaoglan, Fulya Altıparmak, Imdat Kara, Berna Dengiz	LRPSPD	SA	x									
2011	Ismail Karaoglan, Fulya Altıparmak, Imdat Kara, Berna Dengiz	LRPSPD	B&C	x									
2010	Vincent F. Yua, Shih-Wei Lin, Wenyih Lee y Ching-Jung Ting	SALRP	SA	x									
2009	Daniela Ambrosino, Anna Sciomachena, Maria Grazia Scutellà	LRP	VLNS	x									
2007	Sergio Barreto, Carlos Ferreira, Jose Paixa, Beatriz Sousa Santos	CLRP	Heuristic	x									
2007	Sibel Alumur, Bahar Kara	LRP	MIP	x						x			
2007	Rafael Caballero, Mercedes Gonzalez, Flor Guerrero, Julia Molina, Concepción Paralera	LRP	Tabú	x						x			

B= Minimizar Costo. C= Maximizar Utilidad. Minimizar Distancia Recorrida. E= Maximizar servicio. BR= Balancear Rutas. MR= Minimizar Riesgo. ME= Minimizar Emisiones. MT= Minimizar Tiempo. ALNS= Búsqueda adaptativa de gran vecindario. ACO= Optimización de Colonia de Hormigas. LNS= Búsqueda de gran vecindario. MILP= Programación lineal entera mixta. MA= Algoritmo Memético. LS= Búsqueda local. GRASP= Procedimiento de búsqueda adaptable al azar codiciosa. B&C= Ramificación y Corte. SA= Cristalización simulada. MIP= Programación entera. HSA= Cristalización simulada híbrida. VLNS= Búsqueda variable de gran vecindario.

2.4. Conclusiones del capítulo

Según la revisión realizada a la literatura, los problemas tanto de localización de instalaciones como ruteo de vehículos son frecuentemente estudiados, a tal punto que se han particularizado sus aplicaciones para múltiples industrias, sin embargo, la investigación aplicada a la industria del petróleo y gas es un campo con muchas oportunidades de exploración, por lo tanto, se evidencia la oportunidad de aplicar el problema LRP a la industria petrolera.

Según este estudio, el objetivo principal de los modelos de localización y ruteo de vehículos es comúnmente minimizar el costo operativo. Por lo tanto, diseñar un modelo de este tipo podría incrementar el atractivo de proyectos de desarrollo de campos petroleros que de otro modo serían descartados.

Según esta revisión de la literatura, es frecuente encontrar ejemplos de programación lineal entera mixta que intentan resolver este tipo de problemas, para tal fin resulta de utilidad optar por optimizadores comerciales como herramientas de solución.

Ahora bien, los modelos que incluyen factores de gestión del riesgo y Hazmat, cuyos objetivos principales o secundarios se enfocan en la minimización de riesgos inherentes a la operación logran resultados importantes con relación al aseguramiento de las operaciones. Este tipo de herramienta es principalmente útil cuando el decisor está dispuesto a reducir la importancia del aspecto económico a cambio de la minimización de los riesgos de la operación, sin embargo, por la naturaleza de este estudio, solo se abordará la operación básica de transporte y ruteo dejando espacio para la profundización respecto a la gestión del riesgo y materiales peligrosos dentro de las perspectivas de investigación.

Por todo lo anterior, en este trabajo de grado se propone como método de solución el desarrollo de modelos matemáticos con base en la investigación de operaciones, con el fin de solucionar problemas relacionados a la localización de instalaciones y ruteo de vehículos para un sistema de aprovechamiento de GAP.

CAPÍTULO 3

MODELO MATEMÁTICO DE PROGRAMACIÓN

En el desarrollo de este trabajo de grado, se han identificado una serie de características propias de la situación actual sobre la quema y el venteo del GAP, por lo cual en este capítulo se describen las consideraciones y características para el problema de localización de plantas de procesamiento y ruteo de vehículos en un campo petrolero.

El problema abordado implica decisiones operativas, tácticas y estratégicas que deben ser soportadas por métodos estructurados. La cantidad y localización de plantas de procesamiento de GAP conciernen a decisiones estratégicas, la asignación de pozos o clústeres de producción de GAP serán atendidos por cada planta de procesamiento. Por último, en orden operativo es necesario decidir que rutas crear y asignar para transportar el GAP desde los pozos o clústeres de producción hasta cada una de las plantas de procesamiento.

Con el objetivo de integrar los tres niveles de decisión, en este capítulo se presenta un proceso jerárquico compuesto por dos etapas. Primera, construyendo un modelo de localización de instalaciones que a su vez proporcione un sistema de clusterización de los diferentes pozos involucrados. Segunda, dos modelos que resuelvan el problema de ruteo de vehículos con estrategias diferentes, una aprovechando la clusterización ofrecida por el modelo de localización para construir múltiples VRP, y otra, que formule un problema de ruteo Multi Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP).

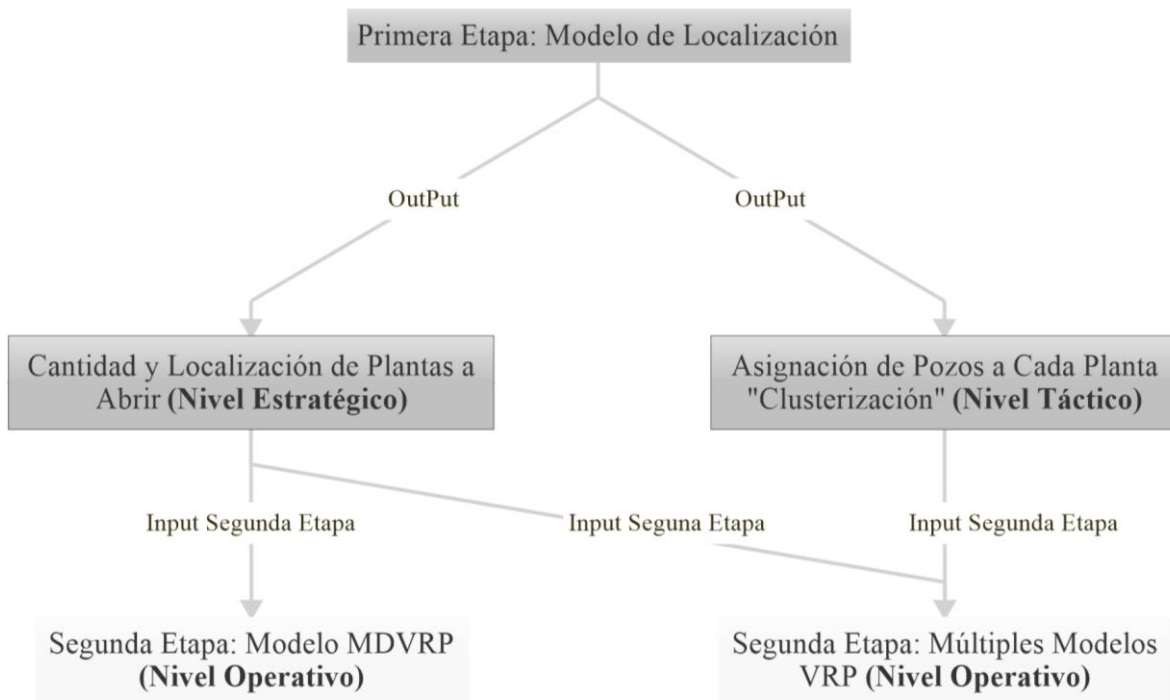


Ilustración 2 Propuesta Jerárquica de Modelamiento

3.1. Supuestos para la localización de instalaciones

La inversión en infraestructura de gran escala es un común denominador a lo largo de la historia de la industria del petróleo, no obstante, avances en el diseño de procesos enfocados en la reducción de costos han permitido crear tecnologías de menor grado, hasta el punto de que hoy en día se pueda contar con micro plantas de procesamiento de GAP cuyas capacidades estándar de procesamiento oscilan entre 0,5 hasta 20 millones de pies cúbicos al día. Conociendo esto, se puede suponer que la tasa de refinación de cada una de las plantas del modelo propuesto podrá rondar dichas magnitudes y este aspecto hará parte de las restricciones del sistema. (He, Khatu, Tenenbaum, Li, y Han, 2016)

Dicho esto, se continúa con el supuesto de que cada planta GPP cuenta con un costo unitario de procesamiento o producción, el cual servirá para determinar una fracción de los costos variables del sistema de estudio. Según He et al., (2016). Los costos de procesamiento del GAP suelen ser inferiores a los \$0,5 por galón de producto terminado. Cabe resaltar, que también existe un factor conocido como la tasa de transformación, el cual sirve como índice para conocer cuál es la relación entre el volumen de gas procesado y el volumen de producto terminado o diésel para el modelo presentado en este estudio y depende tanto de la calidad del gas procesado como de los productos terminados que se quieran obtener.

Ahora bien, según Motherwell y Weinbel (2014), la selección de localizaciones en la industria petrolera ha sido comúnmente liderada por ingenieros experimentados junto a equipos especializados en las ramas de estudios ambientales y sociales que siguen procedimientos cualitativos que frecuentemente conllevan a la selección de locaciones según preferencias subjetivas. Para evitar este tipo de inconveniente, un supuesto de este modelo será que las plantas de procesamiento podrán ser localizadas únicamente en los lugares en donde ya exista un pozo o clúster de producción de GAP.

Siguiendo esta línea, un supuesto necesario para el modelamiento de esta propuesta debe ser que las distancias entre todos los nodos de producción serán dadas inicialmente, entre las cuales se asignará un costo unitario de transporte cada unidad de distancia recorrida por los vehículos. Tal como lo hicieron Tan y Barton, (2015) en su caso aplicado.

Por otra parte, la información sobre la producción de cada pozo o clúster será fija y conocida, se considera que dichas tasas de producción y procesamiento son dadas como inputs principales del modelo propuesto. Todo esto, ya que dicha información es usualmente obtenida por análisis de la planeación estratégica que hace la directiva de cada compañía. (Rocha et al., 2009)

También, se debe considerar que los costos de compra e instalación tanto de las plantas de procesamiento como de la infraestructura que se debe instalar en cada pozo o clúster productor para captar el GAP sin liberarlo a la atmosfera. Este tipo de costos hacen parte de los costos fijos del sistema. Por lo tanto, se consideran parámetros estándar para estos costos que dependerán tanto del número de nodos productores considerados por el modelo, como de la cantidad de plantas de procesamiento que se decida abrir para transformar el GAP producido en el campo petrolero. (López et al., 2016)

Según lo planteado por Fiorot et al., (2016) quienes desarrollaron un modelo de ruteo de barcasas con capacidad definida y plantas de reabastecimiento intermedias, se determina que al momento de definir las rutas para los vehículos, estos inicien sus recorridos totalmente vacíos y atiendan a tantos pozos como sea posible hasta que se alcance su capacidad de carga total.

En relación con los vehículos de transporte, se considera una capacidad de transporte fija, que determina la cantidad máxima de GAP comprimido a transportar. (Alexander y Sergey, 2014)

De acuerdo a lo hecho por Ramírez, Torres, y Muñoz, (2016). Cada vehículo será asignado a una única planta de procesamiento a través de la implementación de una matriz de asignación, esto permitirá que las rutas deban iniciar y terminar en las plantas a las cuales han sido asignados inicialmente. Todo esto, como alternativa para generar rutas cerradas y de esta manera disminuir la complejidad del problema.

3.2. Formulación del modelo matemático de programación lineal

En este capítulo se presenta en primer lugar, una propuesta para solucionar el problema de localización de una o múltiples plantas de procesamiento de gas asociado al petróleo, y se determina la asignación de los pozos a cada una de estas plantas. En segundo lugar, se propone una estrategia de asignación de las rutas de una flota de vehículos para transportar el gas desde los pozos en donde este es producido, hacia cada una de las plantas procesadoras.

Como se puede observar en el capítulo 2, los modelos de localización y ruteo de vehículos se han enfocado mayormente en la reducción de costos. Los cuales están divididos generalmente en dos grupos principales como son los “costos fijos”, y en segundo lugar los costos operativos o “costos variables” Escobar et al., (2014). De acuerdo a lo anterior, se consideró la minimización de los costos como el objetivo que cada modelo desarrollado en la propuesta, con el fin de reducir la inversión a la hora de comprar e instalar la infraestructura de procesamiento, y también, minimizar el costo de transportar el gas producido en el sistema.

A continuación, se muestra la metodología general para los modelos propuestos en este trabajo de grado:

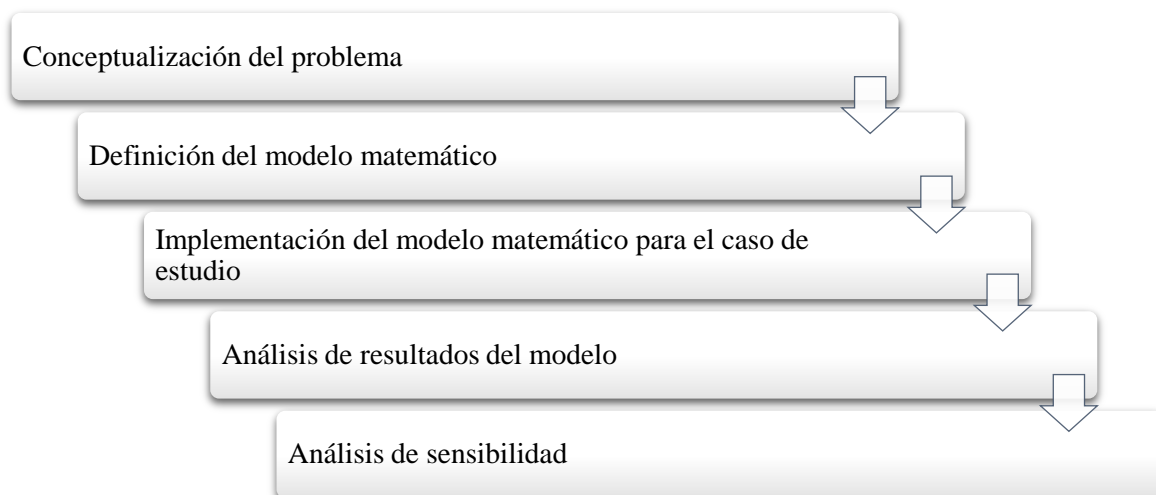


Ilustración 3 Metodología general utilizada para los modelos propuestos

3.3. Modelo Jerárquico de Localización y Ruteo de Vehículos

Se decide jerarquizar la localización de plantas de procesamiento y el ruteo de vehículos como estrategia de abordaje del problema para reducir la complejidad del mismo. De la separación de este problema resultan dos sub-problemas, el primero enfocado en la localización de instalaciones y el segundo en el ruteo de vehículos.

Esta propuesta se realiza en dos etapas, la primera considera todos los nodos de producción de GAP como posibles localizaciones para las plantas de procesamiento, posteriormente, determina la cantidad y localización de las plantas que requerirá el sistema considerando atender la totalidad de GAP producido teniendo en cuenta la capacidad de procesamiento de las plantas, el costo del transporte y la distancia entre los nodos de producción.

La segunda etapa, parte de los resultados de la etapa anterior dado que las plantas localizadas en la misma definen la red de transporte de GAP. De acuerdo a lo anterior, se proponen dos modelos para la definición y asignación de rutas de transporte de GAP, buscando el mínimo costo de inversión, procesamiento y transporte para el sistema.

3.3.1. Etapa 1: Modelo de Localización

El modelo desarrollado para la primera parte de esta propuesta tiene como función objetivo minimizar la suma entre los costos fijos y los costos variables. Los costos fijos estarán dados por los costos de comprar e instalar las plantas, más el costo de comprar e instalar la infraestructura necesaria para captar el gas asociado en los pozos. Por su parte, los costos variables se comprenderán costos de transporte y procesamiento del gas. Cabe resaltar que el costo de transporte se modificó teniendo en cuenta la capacidad estándar de transporte de los vehículos, de tal manera que solo dependa de la distancia recorrida.

Ahora bien, el número, tasa de producción de GAP y localización de los pozos o clústeres será establecido según información conocida. Se considera un único tipo de planta de procesamiento con capacidad fija. Por último, las plantas de procesamiento se podrán instalar únicamente en los nodos donde se encuentren localizados los pozos o clústeres de producción.

Notación

Conjuntos e índices

- I Conjunto de nodos de pozos o clústeres de producción de GAP.
- J Conjunto de posibles localizaciones para las plantas de procesamiento, los cuales son los mismos nodos I .

Parámetros

- S_i Tasa de producción de cada uno de los nodos por día i . Por ejemplo (Pies Cúbicos por día)
- $d_{i,j}$ Distancia entre los nodos i y los nodos j . Por ejemplo (Kilómetros que un vehículo se debe desplazar entre un punto i a un punto j)

Cap	Costo de comprar e instalar cada planta de procesamiento. Por ejemplo (Millones de dólares)
Cact	Costo de captar el GAP por cada pie cúbico cada nodo i . Por ejemplo (dólares por cada mil pies cúbicos captados)
Cop	Costo de procesamiento del GAP por cada pie cúbico que es transformado en cada una de las plantas de procesamiento. Por ejemplo (dólares por cada mil pies Cúbicos procesados al día)
Ctrans	Costo de transportar GAP por kilómetro. Por ejemplo (Dólares por Kilómetro recorrido por cada vehículo)
CP	Capacidad de procesamiento de las plantas por día. Por ejemplo (Pies Cúbicos por día)
F	Número arbitrariamente alto. Por ejemplo (1000000000)

Variables de decisión

Cada variable está asociada a la decisión estratégica de localización en la gestión de la red de procesamiento del GAP. Estas variables determinan donde localizar una planta de procesamiento, que planta atenderá a cuáles pozos o clústeres de producción y cuanta cantidad de GAP será entregada desde cada pozo o clúster a cada una de las plantas de procesamiento. A continuación, se describen las variables de decisión que fueron consideradas para la formulación del modelo:

Y_j	Variable binaria. 1 para localizar una planta en el nodo j , 0 de lo contrario.
$Q_{i,j}$	Variable binaria. 1 para decretar que el nodo i será atendido por la planta localizada en el nodo j , 0 de lo contrario.
$X_{i,j}$	Cantidad de GAP entregado desde el nodo i hacia el nodo j .

Modelo

$$\text{Min} \sum_{\forall j \in J} \text{Cap} * Y_j + \sum_{\forall i \in I} \text{Cact} * S_i + \sum_{\forall i \in I} \sum_{\forall j \in J} \text{Cop} * X_{i,j} + \sum_{\forall i \in I} \sum_{\forall j \in J} \text{Ctrans} * d_{i,j} * X_{i,j} \quad (1)$$

$$\sum_{\forall j \in J} X_{i,j} = S_i, \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{\forall j \in J} Q_{i,j} = 1, \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{\forall i \in I} X_{i,j} \leq \text{Cp} * Y_j, \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$\sum_{\forall j \in J} \text{Cp} * Y_j \geq \sum_{\forall i \in I} S_i \quad (5)$$

$$Q_{i,j} \leq F * Y_j, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (6)$$

$$X_{i,j} \leq F * Q_{i,j}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (7)$$

$$X_{i,j} \geq Q_{i,j}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (8)$$

$$Y_i \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I \quad (9)$$

$$Q_{i,j} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (10)$$

$$X_{i,j} \geq 0, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (11)$$

La función objetivo del modelo de localización (1) consiste en minimizar el costo total del sistema. El cual se descompone de 4 factores que incluyen “Costo Capital”, “Costo Operacional de Captar el GAP”, “Costo de Procesamiento del GAP en Cada Planta” y “Costo de Transportar el GAP”. Ahora bien, la restricción (2) asegura que la totalidad de la producción de GAP del campo sea procesada. La restricción (3) permite que cada nodo de producción i sea atendido por un único nodo de procesamiento j . La restricción (4) impide que la cantidad del GAP enviado desde el nodo productor i hasta el nodo de procesamiento j sea mayor que la capacidad de procesamiento de cada nodo j . La restricción (5) asegura que se abran la suficiente cantidad de plantas para que la capacidad de procesamiento del sistema sea mayor o igual a la totalidad del GAP producido por los nodos i . La restricción (6) garantiza que todos los nodos i sean atendidos por algún nodo j en donde se encuentre abierta una planta de procesamiento. Las restricciones (7) y (8) son relacionales entre las variables X y Q . (7) evita que se entregue GAP desde un nodo i hacia un nodo j que no deba atenderlo. (8) Asegura que cuando cualquier nodo i que deba ser atendido por un nodo j , se entregue GAP desde i hacia j . Las restricciones (9), (10) y (11) caracterizan las variables de decisión consideradas en el problema.

3.3.2. Etapa 2: Modelos de Ruteo

Para la segunda parte de la propuesta la función objetivo buscará minimizar el costo total de transporte del GAP desde los pozos hacia las plantas de procesamiento. También, se considera un único tipo de vehículos de transporte con capacidad restringida, para ello la cantidad de vehículos es definida de antemano de tal modo que se pueda transportar la totalidad del GAP producido por todos los pozos. Cabe resaltar que el costo de transporte dependerá linealmente de la distancia recorrida, donde el factor C_{trans} se descompondrá en pesos por kilómetro recorrido (\$/km). Ahora bien, los vehículos inician las rutas vacíos y podrán visitar tantos pozos como sea posible hasta alcanzar su capacidad máxima de carga, teniendo en cuenta que cada pozo solo será visitado por un único vehículo, y finalizan en las respectivas plantas a la cuales han sido asignados. Por último, la cantidad y localización de las plantas de procesamiento se obtendrán a partir de los resultados del modelo de localización.

Como se mencionó previamente, se evaluarán dos formulaciones diferentes para resolver el problema de ruteo de vehículos. Una aprovechando la clusterización ofrecida por el modelo de localización para construir múltiples VRPs, y otra, que conforme un problema de ruteo Multi Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP). Todo esto, con la intención de comparar y establecer la mejor estrategia de abordaje a un caso real de estudio.

Dada la complejidad del problema de localización y ruteo de vehículos, se propone una estrategia de reducción de la dificultad de las corridas computacionales a través de la división del costo total de transporte en 2 etapas. Primera etapa (Costo de Transporte 1), consta de la construcción de rutas que incluyen un único pozo, generadas a partir de los resultados del modelo de localización donde cada vehículo salgan de una única planta vacío, posteriormente visite un único pozo asignado y por último vuelvan a la planta origen, cabe resaltar, que esto se hace debido a que la capacidad de producción de los pozos es mayor que la capacidad de transporte de los vehículos. Segunda etapa (Costo de Transporte 2), donde las rutas generadas por los modelos incluirán la visita de al menos dos o más pozos antes de que los vehículos puedan volver a su planta de origen. Todo esto disminuye la complejidad del problema de localización y ruteo, disminuyendo la cantidad de vehículos a utilizar en el caso del MDVRP, y por su parte, reduciendo la cantidad de nodos y vehículos a utilizar en los modelos de VRP.

3.3.2.1. Modelo MDVRP

El MDVRP obtendrá como input del modelo de localización la cantidad y ubicación de las plantas de procesamiento GPP, a partir de esto, diseñará un sistema de rutas para los vehículos involucrados en la operación para encontrar solución para todo el problema en una sola corrida.

Notación

Conjuntos e índices

K	Conjunto de vehículos $K=\{1...k\}$.
m	Conjunto de plantas de procesamiento resultantes del modelo de localización $[1...m]$.
n	Conjunto de pozos o clústeres de producción $[m+1...n]$.
I	Conjunto de nodos de plantas de procesamiento $[1...m]$ y nodos de pozos de producción de GAP $[m+1...n]$. $I=\{1...n\}$.
J	Conjunto de nodos destino de cada tramo descrito por el grafo $X(i,j,k)$ iguales a I .
N	Número total de nodos de la red.
$a(k,i)$	Matriz binaria de asignación de los vehículos K a las plantas $I=\{1...m\}$.
$d(i)$	Pies cúbicos de GAP producidos por día en cada pozo $I=\{m+1...m+n\}$.
$q(j)$	Capacidad de procesamiento en pies cúbicos por día de cada planta de procesamiento $I=\{1...m\}$. Por ejemplo (Pies Cúbicos por día)
$b(k)$	Capacidad de carga máxima en pies cúbicos por cada vehículo K . Por ejemplo (Pies cúbicos por vehículo)
$c(i,j)$	Distancia en kilómetros entre los nodos I y J .

Ctrans Costo de transportar GAP por kilómetro. Por ejemplo (Dólares por Kilómetro recorrido por cada vehículo)

Variables de decisión

Para este segundo modelo, las variables están asociadas a las decisiones operativas de ruteo de la red de vehículos que transportan el GAP desde cada uno de los pozos o clústeres hacia las plantas de procesamiento. Estas variables determinan si un vehículo recorre o no un arco formado entre nodos, también, si la demanda del nodo **I** es atendida o no por el vehículo **K**, así mismo, el orden en que los nodos serán atendidos. A continuación, se describen las variables de decisión que fueron consideradas para la formulación del modelo:

- X(i,j,k)** Variable binaria, 1 si el vehículo **K** recorre el arco formado por los nodos **I, J**. 0 de lo contrario.
- Y(i,k)** Variable binaria, 1 si el vehículo **K** atiende la demanda del nodo **I**. 0 de lo contrario.
- u(i,k)** Variable auxiliar para evitar subtours en las rutas de los vehículos.

Las restricciones (3), (4), (5) y (6) se relacionan con la matriz de la tabla 4 para el parámetro a(k,i). Para asignar los vehículos a las plantas de procesamiento (Ramírez et al., 2016).

Tabla 4 Matriz de asignación de vehículos

		i1	i2
a(k,i)	K1	1	0
	K2	1	0
	K3	1	0
	K4	0	1
	K5	0	1
	K6	0	1

Modelo

$$\text{Min} \sum_{\forall i \in I, j \in J, k \in K} C_{i,j} * X_{i,j,k} \quad (12)$$

$$\sum_{\forall i \in I} d_i * Y_{i,k} \leq b_k, \quad \forall k \in K \quad (13)$$

$$\sum_{\forall j \in J} X_{i,j,k} = 1, \quad \forall i < n+1, k \in K, a_{k,i} > 0 \quad (14)$$

$$\sum_{\forall i \in I} X_{i,j,k} = 1, \quad \forall j < n+1, k \in K, a_{k,j} > 0 \quad (15)$$

$$\sum_{\forall j \in J} X_{i,j,k} = 0, \quad \forall i < n+1, k \in K, a_{k,i} < 1 \quad (16)$$

$$\sum_{\forall i \in n} X_{i,j,k} = 0, \quad \forall j < n+1, k \in K, a_{k,i} < 1 \quad (17)$$

$$u_{i,k} - u_{j,k} + N * X_{i,j,k} \leq N - 1, \quad \forall i \in n, j \in n, k \in K \quad (18)$$

$$\sum_{\forall k \in K} Y_{i,k} = 1, \quad \forall i \in n \quad (19)$$

$$\sum_{\forall i \in I} X_{i,j,k} = Y_{j,k}, \quad \forall j \in n, k \in K \quad (20)$$

$$\sum_{\forall j \in J} X_{i,j,k} = Y_{i,k}, \quad \forall i \in n, k \in K \quad (21)$$

$$X_{i,j,k} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (22)$$

$$Y_{j,k} \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J, k \in K \quad (23)$$

$$u_{i,k} \geq 0, \quad \forall i \in I, k \in K \quad (24)$$

La función objetivo del modelo de ruteo (12) consiste en minimizar el costo total de transporte de GAP, el cual se compone del costo de transportar la totalidad del gas hacia las plantas de procesamiento. La restricción (13) garantiza que la suma de las demandas de cada pozo visitado por un vehículo k no supere la capacidad de carga del vehículo. La restricción (14) garantiza que los vehículos asignados a una planta deben salir de la planta una única vez. La restricción (15) hace que los vehículos asignados a una planta deben llegar a esa planta una única vez. La restricción (16) evita que un vehículo salga de una planta a la que no esté asignado. La restricción (17) evita que un vehículo llegue a una planta a la que no esté asignado. La restricción (18) garantiza la ruptura de los sub-ciclos de las rutas (Ahmadi & Seddighi, 2013). A su vez, la restricción (19) garantiza que todos los nodos pertenecientes a n sean visitados por un único vehículo. Las restricciones (20) y (21) garantizan que se llegue y se salga hacia y desde cada nodo respectivamente. Las restricciones (22), (23) y (24) describen la naturaleza de las variables.

3.3.2.2. Modelo VRP

El modelo VRP obtendrá como input del modelo de localización no solo la cantidad y ubicación de las plantas de procesamiento GPP como lo hace el modelo MDVRP. También, obtendrá la clusterización necesaria para subdividir el problema en tantos VRP como plantas se decida abrir a partir del modelo de localización.

Notación

Conjuntos e índices

K	Conjunto de vehículos $K=\{1...k\}$.
m	Conjunto de plantas de procesamiento resultantes del modelo de localización. $[1...m]$

n	Conjunto de pozos o clústeres de producción. $[m+1 \dots n]$
I	Conjunto de nodos de plantas de procesamiento $[1 \dots m]$ y nodos de pozos o clústeres de producción de GAP $[m+1 \dots n]$. $I=\{1 \dots n\}$.
J	Conjunto de nodos destino de cada tramo descrito por el grafo $X(i,j,k)$ iguales a I .
N	Número total de nodos de la red.
R	Número total de vehículos de la red.

Parámetros

$d(i)$	GAP producidos por día en cada pozo $I=\{m+1 \dots n\}$. Por ejemplo (Pies Cúbicos por día)
$q(j)$	Capacidad de procesamiento en pies cúbicos por día de cada planta de procesamiento $I=\{1 \dots m\}$. Por ejemplo (Pies Cúbicos por día)
$b(k)$	Capacidad de carga máxima en pies cúbicos por cada vehículo K . Por ejemplo (Pies cúbicos por vehículo)
$c(i,j)$	Distancia entre los nodos I y J . Por ejemplo (Kilómetros entre un punto i y un punto j)
C_{trans}	Costo de transportar GAP por kilómetro. Por ejemplo (Dólares por Kilómetro recorrido por cada vehículo)

Variables de decisión

Para este segundo modelo, las variables están asociadas a las decisiones operativas de ruteo de la red de vehículos que transportan el GAP desde cada uno de los pozos o clústeres hacia las plantas de procesamiento. Estas variables determinan si un vehículo recorre o no un arco formado entre nodos, también, si la demanda del nodo I es atendida o no por el vehículo K , así mismo, el orden en que los nodos serán atendidos. A continuación, se describen las variables de decisión que fueron consideradas para la formulación del modelo:

$X(i,j,k)$	Variable binaria, 1 si el vehículo K recorre el arco formado por los nodos I,J , 0 de lo contrario.
$Y(i,k)$	Variable binaria, 1 si el vehículo K atiende la demanda del nodo I , 0 de lo contrario.
$u(i,k)$	Variable positiva, se encarga de establecer el orden en que los nodos I serán atendidos.

Modelo

$$\text{Min} \sum_{\forall i \in I, j \in J, k \in K} C_{\text{trans}} * C_{i,j} * X_{i,j,k} \quad (25)$$

$$\sum_{\forall i \in I} d_i * Y_{i,k} \leq b_k, \quad \forall k \in K \quad (26)$$

$$\sum_{\forall k \in K} Y_{m',k} = R \quad (27)$$

$$\sum_{\forall k \in K} Y_{i,k} = 1, \quad \forall i \in n \quad (28)$$

$$\sum_{\forall i \in I} X_{i,j,k} = Y_{j,k}, \quad \forall j \in J, k \in K \quad (29)$$

$$\sum_{\forall j \in J} X_{i,j,k} = Y_{i,k}, \quad \forall i \in I, k \in K \quad (30)$$

$$u_{i,k} - u_{j,k} + N * X_{i,j,k} \leq N - 1, \quad \forall i \in n, j \in n, k \in K \quad (31)$$

$$X_{i,j,k} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (32)$$

$$Y_{j,k} \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J, k \in K \quad (33)$$

$$u_{i,k} \geq 0, \quad \forall i \in I, k \in K \quad (34)$$

La función objetivo del modelo de ruteo (25) consiste en minimizar el costo total de transporte de GAP, el cual se compone del costo de transportar la totalidad del gas hacia las plantas de procesamiento. La restricción (26) garantiza que la suma de las demandas de cada pozo visitado por un vehículo k no supere la capacidad de carga del vehículo. La restricción (27) garantiza que los vehículos asignados a una planta deben salir de la planta una única vez. La restricción (28) garantiza que todos los nodos pertenecientes a n sean visitados por un único vehículo. Las restricciones (29) y (30) garantizan que se llegue y se salga hacia y desde cada nodo respectivamente. La restricción (31) garantiza la ruptura de los sub-ciclos de las rutas (Ahmadi & Seddighi, 2013). Por último, las restricciones (32), (33) y (34) describen la naturaleza de las variables.

3.4. Conclusiones

Las propuestas planteadas en este capítulo son novedosas debido a que no existen modelos de este tipo que se enfoquen diseñar un modelo de recolección y procesamiento del gas asociado al petróleo en un campo petrolero. Esto facilita la toma de decisiones de forma transversal en los tres niveles de decisión que existen en una compañía operadora, ya que permiten definir cuantas plantas abrir, que pozos atender desde cada planta y cuanto volumen de GAP atender desde cada planta, junto con el establecimiento de rutas de recolección del GAP en simultaneo.

Ahora bien, los factores identificados que influyen en la formulación de los dos modelos son:

- Localización de los pozos.
- Clústerización o agrupación de los pozos.

- Tasa de producción de GAP por pozo.
- Costo capital de comprar e instalar las plantas de procesamiento.
- Costo de captar el GAP producido en cada pozo.
- Costo de procesar el GAP en cada una de las plantas.
- Costo de transportar el GAP desde los pozos hasta las plantas de procesamiento.
- La capacidad de procesamiento de GAP de las plantas.
- La capacidad de carga de los vehículos transportadores de GAP.

Por último, cabe resaltar que todas las formulaciones matemáticas presentadas anteriormente fueron probadas en instancias pequeñas para corroborar su capacidad de obtener soluciones óptimas y lógicas que cumplan con las restricciones impuestas en cada modelo. Esto permitió validar la eficacia de los modelos al momento de encontrar soluciones a cada uno de los problemas antes de ser evaluados en ambientes más complejos como el presentado en el caso de estudio.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS COMPUTACIONALES Y CASO DE ESTUDIO

Los planteamientos del capítulo 3 son un conjunto de modelos exactos que se pretende sean considerados como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones de cualquier compañía operadora de la industria del petróleo y gas. El objetivo de la propuesta es minimizar el costo global del sistema de recolección y aprovechamiento del GAP producido.

El presente capítulo muestra los resultados de la propuesta bajo un escenario base, planteado a partir de algunos parámetros y características reales del campo Orito. Para lo cual, se contó con la totalidad de los pozos existentes en el campo a diciembre de 2015, cabe resaltar que la producción total de GAP se compone del volumen quemado y el volumen venteado. Para el caso de estudio, el GAP quemado se tomó de los reportes de gas incinerado en el campo Orito durante el 2015, sin embargo, cabe resaltar no se tuvo en cuenta el volumen de GAP que es venteado debido a que no existe un registro exacto que permita cuantificarlo.

4.1. Caso de Estudio

Orito, es un campo petrolero perteneciente a la cuenca “Caguán-Putumayo” a la cual pertenecen, otros 19 campos petroleros menores. Su exploración comenzó en el año 1948 a manos de la compañía Texaco Petroleum Company, sin embargo, no fue sino hasta el año 1963 que se hizo el descubrimiento de las grandes reservas petroleras del campo con 250 millones de barriles de petróleo. (Barrero, Pardo, Vargas, y Martínez, 2007)

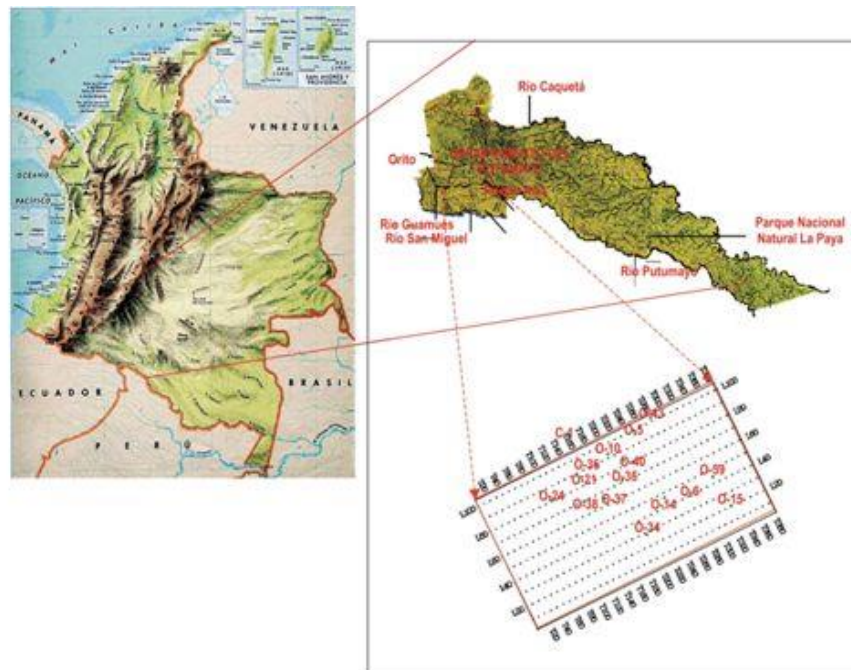


Ilustración 4 Campo Orito Putumayo, Colombia tomado de Universidad Nacional de Colombia, (2010)

Para efectos de este estudio, el área perforada estará comprendida dentro del polígono formado por las siguientes coordenadas geográficas en sistema cartesiano de longitud y latitud X: (684.120 - 691.600); Y: (554.391 - 571.652) respectivamente. Esta información fue reportada por parte de la Agencia Nacional de Hidrocarburos, (2016), en el reporte “*Shape de pozos 2015*” en donde se encuentra que los pozos productores existentes en el campo Orito a finales del año 2015 sumaban 110 unidades en total.

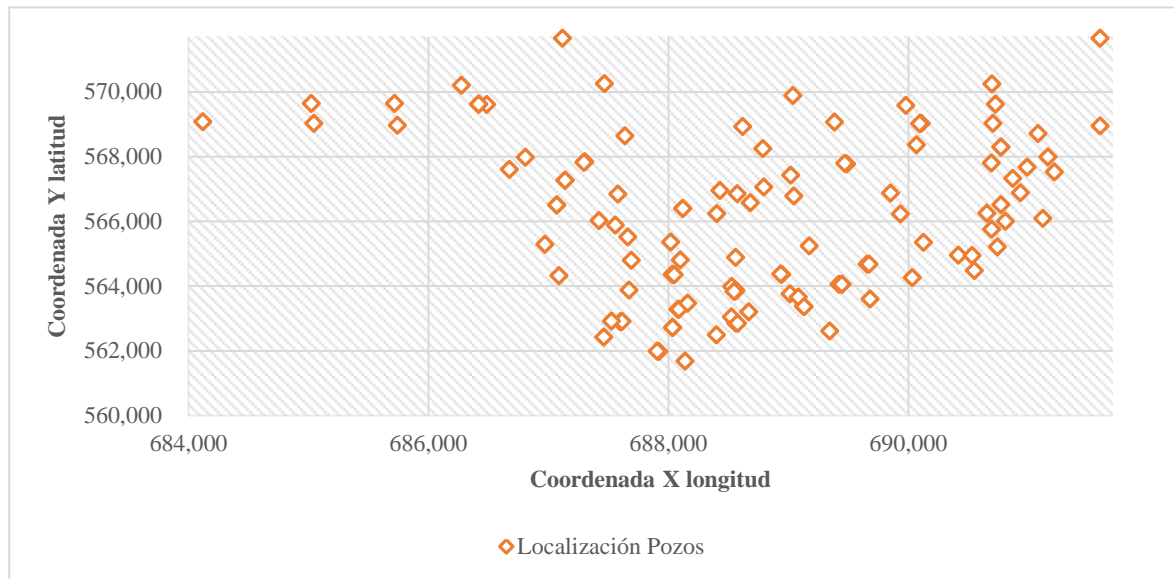


Ilustración 5 Distribución de pozos campo Orito 2015, elaborado por el autor

4.2. Ambiente Computacional

Para la validación de los modelos exactos planteados en el capítulo 3 se utilizó el lenguaje del software comercial GAMS IDE utilizando el solver CPLEX, el cual fue ejecutado en un Intel(R) Core(TM) i7-4510U CPU de 2.00 GHz con 8 GB de RAM. La validación se llevó a cabo de manera secuencial, es decir, no se ejecutaba más de un modelo u operación a la vez, esto con el fin de hacer uso de toda la capacidad del CPU.

4.3. Escenario Base

Para comenzar, la cantidad de GAP mensual quemado por el campo Orito es en promedio de 8 millones de pies cúbicos al día Agencia Nacional de Hidrocarburos, (2017). No obstante, dado que no se conoce la información de cuanto GAP es quemado por cada pozo individualmente, se decidió establecer una producción promedio por pozo de 63.000 pies cúbicos al día, cuya infraestructura instalada para captar el GAP aporta un costo variable equivalente a \$0,35 por cada mil pies cúbicos producidos y luego captados. (United States Energy Information Administration, 2016)

Ahora bien, se considerarán dos instancias de evaluación, una primera con plantas GPP tipo A que puedan tratar 1'500.000 pies cúbicos de GAP por día, y otra instancia donde la tasa de procesamiento diaria de cada planta tipo B sea de 1'000.000 pies cúbicos de GAP por día. Estas plantas de procesamiento pueden producir aproximadamente un promedio de 3,57 galones de diésel por cada 1.000 pies cúbicos de GAP procesados. También, se tiene en cuenta que el costo de comprar e instalar cada planta tipo A es de \$27 millones de dólares y cada planta tipo B \$19,5 millones de dólares, adicionalmente, el costo variable de procesamiento de dichas unidades es de \$0,53 por cada mil pies cúbicos procesados en ambos tipos de planta. (Tan y Barton, 2015)

Para continuar, de acuerdo a Tan y Barton (2015), se encuentra que el costo de transportar en camión cisterna 10.000 pies cúbico de GAP por cada kilómetro recorrido es de \$3,46 donde la capacidad de transporte de cada vehículo empleado por el modelo será de 10.000 pies cúbicos de GAP. Para efectos de construcción de las rutas para las flotas de vehículos se supondrán líneas rectas formadas entre las coordenadas cartesianas “X” y “Y” de los nodos de producción.

Tabla 5 Resumen de parámetros de modelamiento

Parámetro	Valor	Comentario
Cantidad de Pozos	110	Unidades
Producción GAP por Pozo	63.000	Pies de GAP/día
Captación GAP	\$ 0,35	Dólares/ 1000 pies cúbicos producidos
Factor de Conversión	3,57	Galones de Diésel Producidos/1000 Pies Cúbico Procesados
Capacidad Procesamiento Plantas	Tipo A 1'500.000	Pies Cúbicos de GAP/día
	Tipo B 1'000.000	
Costo Planta GPP	Tipo A \$ 27'000.000	Dólares (Costo de Compra e Instalación)
	Tipo B \$ 19'500.000	
Costo Procesamiento GAP	\$ 0,53	Dólares/Por cada 1.000 pies procesados
Costo Transporte GAP	\$ 3,46	Dólares/Por kilómetro recorrido
Capacidad de Carga de los vehículos	10.000	Pies cúbicos de GAP / vehículo

4.4. Experimentación y resultados

Como hemos visto los modelos propuestos son complejos y se basan en los problemas de localización y transporte con capacidad restringida (CLRP). A continuación, la Tabla No 6 muestra una sección de las distancias en líneas rectas existentes entre los primeros 8 de los 110 pozos de producción de GAP existentes en el campo Orito. En el **Anexo 1** se presentan los datos reales de distancias entre los pozos según las coordenadas cartesianas “X” y “Y” que ha reportado la Agencia Nacional de Hidrocarburos de Colombia.

Tabla 6 Sección de matriz de distancias [km] entre nodos, elaboración propia del autor

	ORITO-1	ORITO-1H	ORITO-1 HST	ORITO SUR-1	ORITO-2	ORITO-3	ORITO-4	ORITO-5
ORITO-1	0	2	2	13	1	1	3	4
ORITO-1H	2	0	0	12	1	1	3	4
ORITO-1 HST	2	0	0	12	1	1	3	4
ORITO SUR-1	13	12	12	0	12	12	10	16
ORITO-2	1	1	1	12	0	1	2	4
ORITO-3	1	1	1	12	1	0	3	4
ORITO-4	3	3	3	10	2	3	0	7
ORITO-5	4	4	4	16	4	4	7	0

Por otra parte, La producción de GAP diaria fue tomada de los reportes de producción fiscalizada gravable del GAP quemado al día por el campo Orito, ubicado en el departamento del Putumayo realizados según el “*Balance de Producción de Gas 2015*”. (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2017)

4.4.1. Modelo de Localización

El objetivo del modelo es minimizar el costo total del sistema, el cual se compone del costo de comprar e instalar las plantas de procesamiento, más el costo de comprar e instalar la infraestructura de captación en cada uno de los pozos i , más el costo de procesamiento del GAP entregado a los nodos j , más el costo de transportar la totalidad del gas hacia las plantas de procesamiento. Según esto, el modelo de localización determinó abrir 5 plantas de capacidad de procesamiento 1’500.000 pies cúbicos por día (Instancia 1) y 8 plantas de procesamiento, estos resultados se muestran con más detalle en la tabla 7. Por otra parte, las coordenadas de las plantas a abrir son presentadas en la ilustración 6.

Tabla 7 Resultados Modelo de Localización, Plantas a Abrir

Plantas Tipo A a Abrir Instancia 1	Plantas Tipo B a Abrir Instancia 2
ORITO-26	ORITO-12
ORITO-35	ORITO-31D
ORITO-69	ORITO-35
ORITO-73	ORITO-47
ORITO-99	ORITO-58
	ORITO-71
	ORITO-77
	ORITO-91

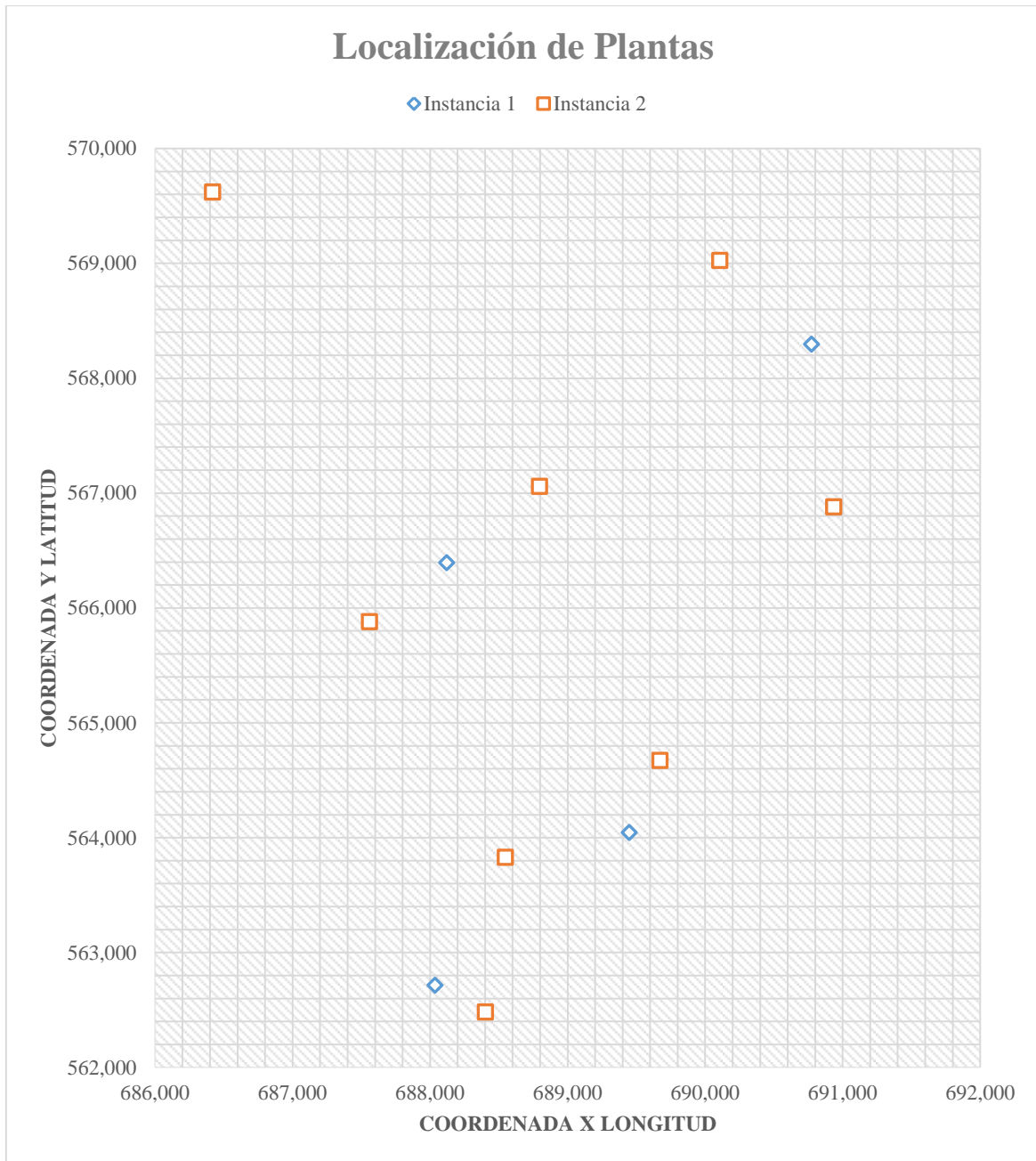


Ilustración 6 Resultado modelo de localización: Coordenadas de plantas a abrir

Ahora bien, el modelo de localización no solo determina que plantas se deben abrir, también, indica que pozos deberán ser atendidos por cada planta de procesamiento abierta. Cabe resaltar, que como se muestra en la formulación del modelo, cada pozo podrá ser atendido por una única planta para el modelo de localización. A continuación, en las ilustraciones 7 y 8 se presentan los resultados de la asignación de los pozos a las plantas donde las clusterizaciones propuestas por el modelo de localización son representadas por los distintos colores. NOTA: El Anexo 3 muestra los resultados del modelo de localización.

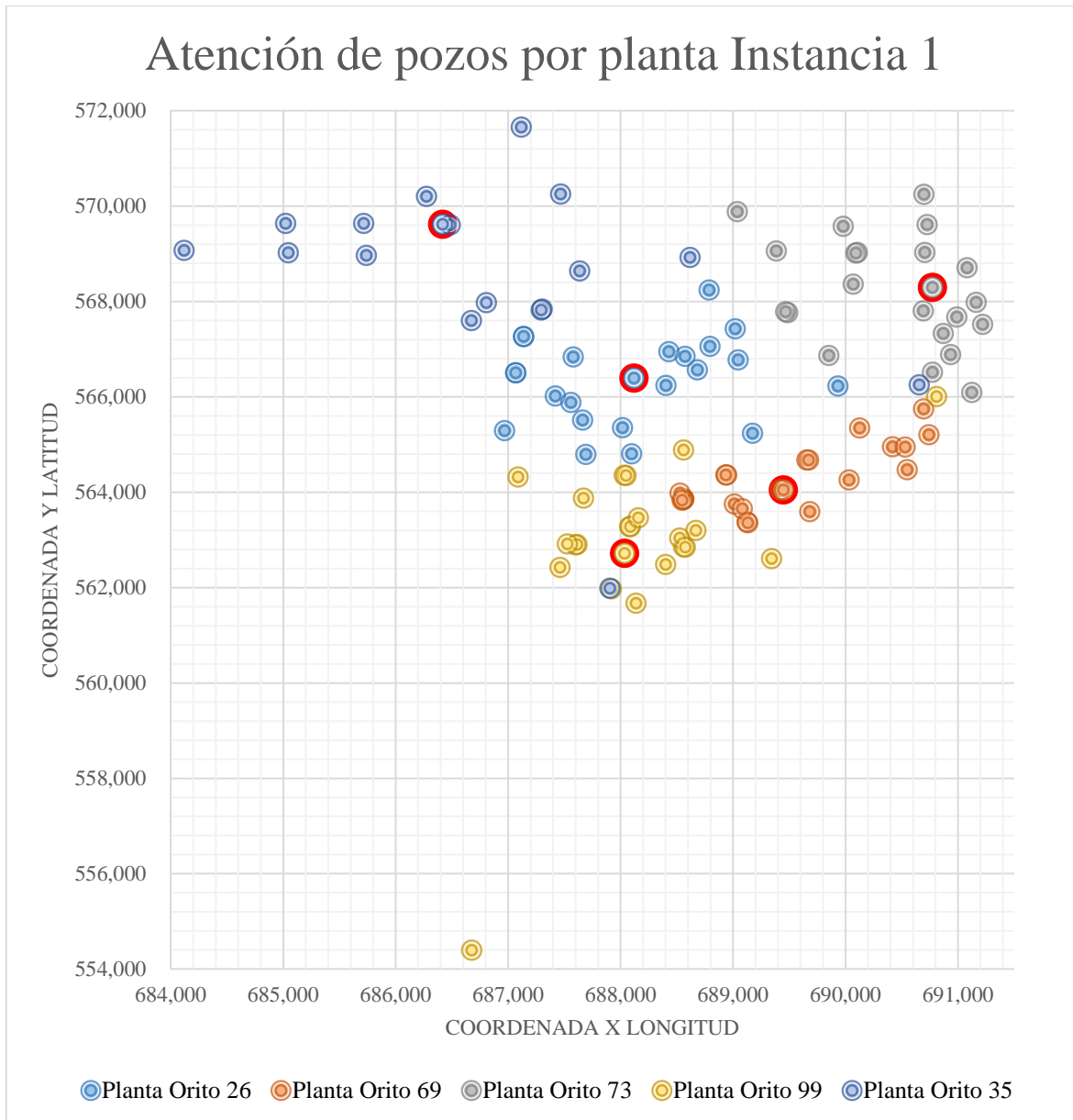


Ilustración 7 Resultado modelo de localización: Atención de pozos por planta (Instancia 1)

Teniendo en cuenta que la capacidad de carga de cada vehículo es de 10.000 pies cúbicos de GAP y la demanda por pozo es de 63.000 pies cúbicos de GAP por día. Se establece que se podría cubrir una fracción de la demanda de cada pozo equivalente a 60.000 pies cúbicos por día, si se decide definir 6 trayectos hacia cada pozo siguiendo la clusterización realizada por la variable X_{ij} del modelo de localización. Cabe resaltar que dicha trayectoria se compondría de que un vehículo salga desde su planta vacío, visite el pozo asignado y vuelva a la planta de origen (Costo Transporte 1).

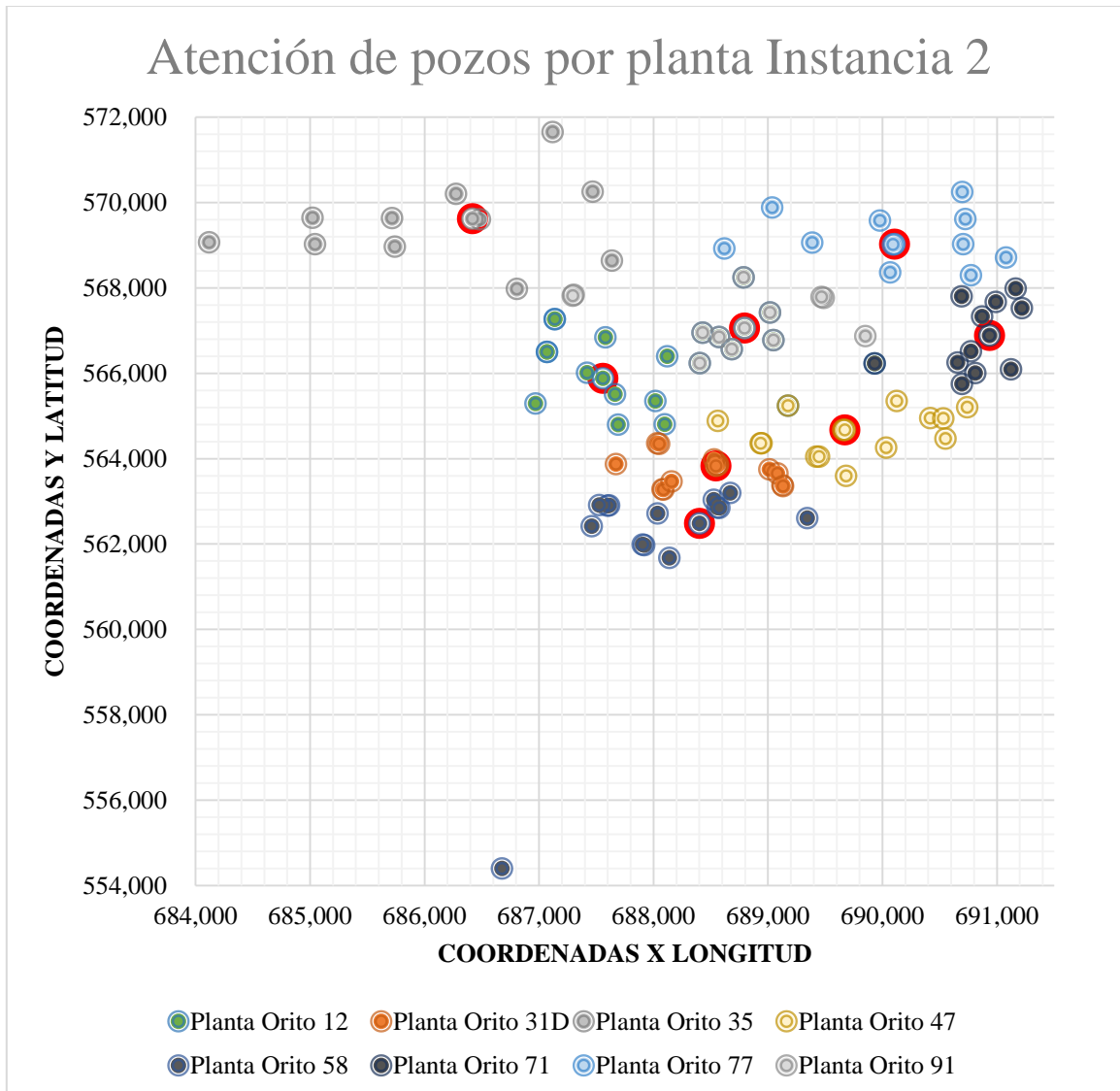


Ilustración 8 Resultado modelo de localización: Atención de pozos por planta (Instancia 2)

Lo anterior con la intención de disminuir la cantidad de variables a utilizar por los modelos de ruteo y por ende disminuir su complejidad. Cabe resaltar que la demanda pendiente equivalente a 3.000 pies cúbicos al día en cada pozo será atendida por medio de las rutas que determinen los modelos de ruteo MDVRP y VRP (Costo Transporte 2), como se define en el numeral 3.3.2. Además de esto, se determina un tiempo computacional máximo de 5 horas por instancia. En otras palabras, con base en los resultados del modelo de localización se resolverá el problema de transporte de vehículos para 60.000 pies cúbicos diarios en cada pozo. La ilustración 9 representa la estrategia de abordaje al caso de estudio, donde se puede apreciar como a modo de árbol de decisión se evaluaron y encontraron los mejores desempeños entre todas las instancias propuestas.

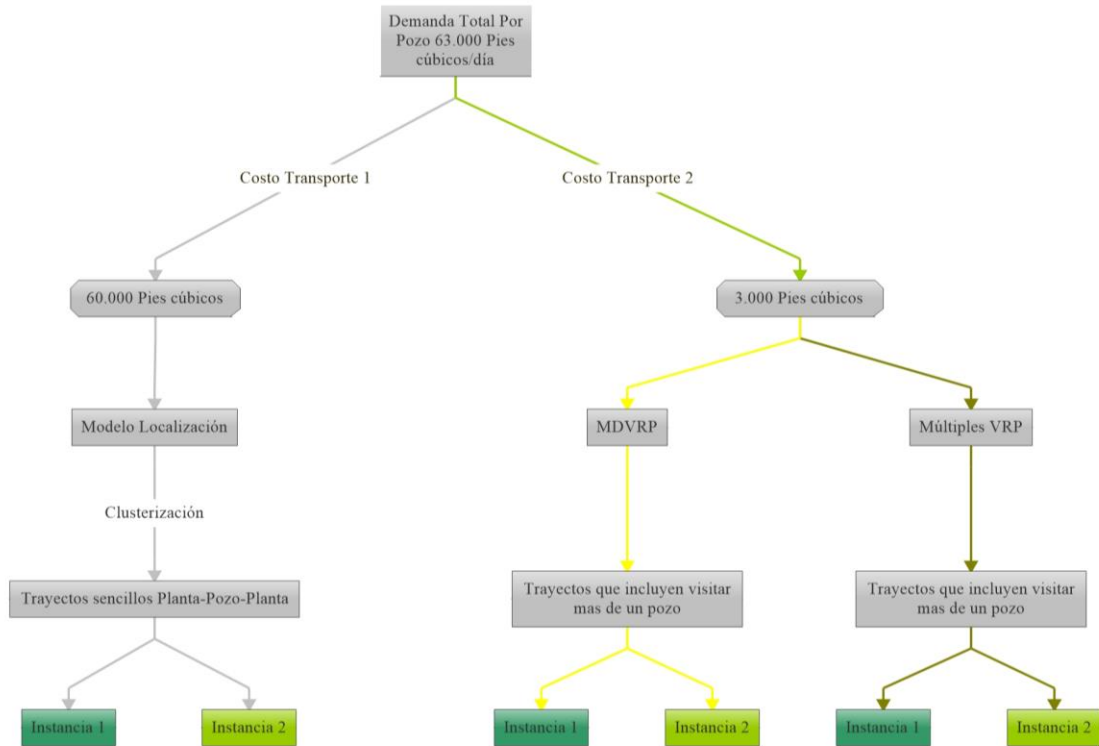


Ilustración 9 Estrategia de Abordaje al Caso de Estudio

Los resultados obtenidos en las dos instancias de investigación, son mostrados en la tabla número 7. Donde aspectos como el costo de captar el GAP, costo de producción y la cantidad de diésel producido son constantes dado que la propuesta busca captar y procesar todo el GAP producido en el campo Orito, además de que el costo unitario de procesamiento es el mismo para los dos tipos de planta consideradas. (Tan & Barton, 2015)

Tabla 8 Resultado modelo de localización: Resumen de resultados

Ítem	Valor Instancia 1	Valor Instancia 2	Comentario
Costo de Captar el GAP	2.426	2.426	USD/día
Cantidad de Plantas	5	8	unidades
Costo Total Plantas GPP	135.000.000	156.000.000	USD
Diésel Producido	1.386	1.386	Barriles/día
Costo de Producción	1.532	1.532	USD/día
Costo de Transporte 1	5.772	3.948	USD/día

4.4.2. Modelos de Ruteo de Vehículos

Por medio de la experimentación realizada, al ejecutar el modelo de ruteo MDVRP con 110 nodos y más de 33 vehículos necesarios para cubrir la demanda de GAP total, la capacidad computacional disponible no logra encontrar resultados factibles en menos de 72 horas de iteración continua (Tiempo de Iteración Grande). Por lo anterior, se decidió realizar la fragmentación del costo total de transporte mostrada en la ilustración 9.

Ahora bien, el objetivo de los modelos de ruteo es minimizar el costo de transportar el GAP remanente en cada pozo hacia las plantas de procesamiento denominado Costo de Transporte 2 (3.000 pies cúbicos al día por pozo). Para ello se debe tener en cuenta que el modelo de localización determinó abrir 5 y 8 plantas de procesamiento en las diferentes instancias, por lo cual la red de transporte se conforma tal como se presenta en la Tabla 8.

Tabla 9 Configuración de las redes de transporte (Instancias 1 y 2)

Instancia	Total Nodos (Total Plantas + Total Pozos)	Total Plantas	Total Pozos
1	115	5	110
2	118	8	110

Para continuar, con la intención de evaluar la consistencia de los resultados que generan los modelos de ruteo propuestos en tiempos de corrida menores a 1 día, en la siguiente sección se estableció un tiempo límite de iteración equivalente a 5 horas en el software GAMS IDE para cada estrategia de ruteo.

Otro input importante del modelo de ruteo obtenido a partir del análisis de los resultados del modelo de localización es la cantidad de vehículos asignados a cada planta de procesamiento. Teniendo en cuenta que existe una restricción de capacidad de procesamiento, se asignarán tantos vehículos como sea posible para cumplir la demanda de los pozos asignados sin sobrepasar la capacidad de procesamiento de cada planta.

4.4.2.1. Modelo MDVRP

Con base en lo anterior, la matriz de asignación de los vehículos a las plantas se muestra en el **Anexo 2**. Para continuar, la ilustración 10 muestra las rutas generadas por el modelo MDVRP para la planta Orito 26. Cabe resaltar que, el modelo MDVRP no logró establecer ningún resultado factible en la instancia 2 antes de ocupar la capacidad máxima del sistema computacional utilizado.

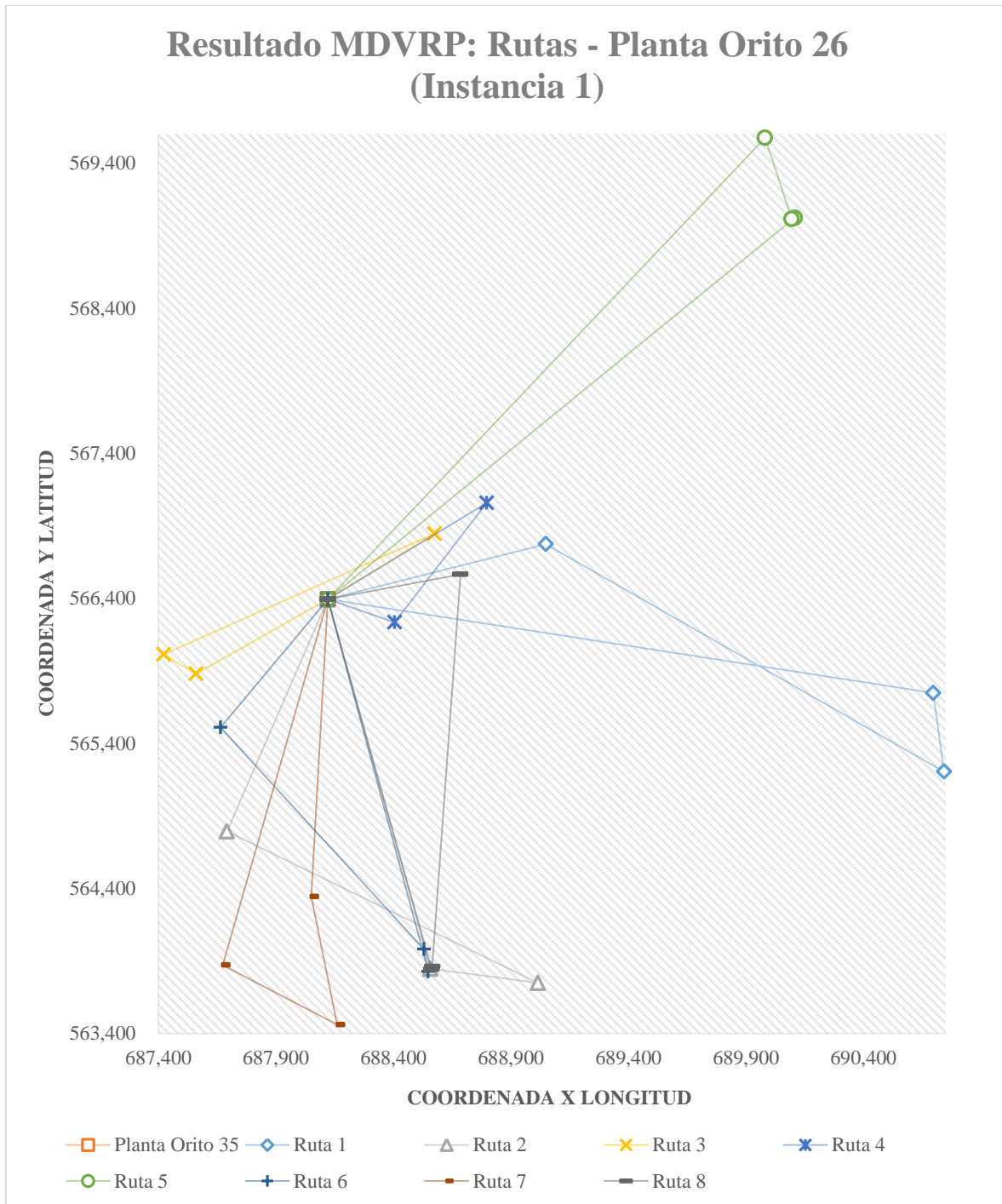


Ilustración 10 Resultado modelo MDVRP: Rutas - Planta Orito 26

NOTA: las rutas diseñadas por el modelo de ruteo MDVRP se muestran en el **Anexo No 4**.

A continuación, se muestran los resultados financieros del modelo en comparación con la mejor solución posible encontrada por el solver CPLEX.

Tabla 10 Resultado modelo MDVRP: Desempeño de las soluciones

Unidad	Resultado Costo de Transporte 2 [USD/día]	GAMS (Mejor posible)	Diferencia Relativa gap %	Tiempo de Corrida
Costo Total (Instancia 1)	\$1.133	\$295	74%	5 horas
Costo Total (Instancia 2)	No Encontrados	No Encontrados	No Encontrados	No Encontrados

4.4.2.2. Modelo VRP

Para comenzar con los resultados del modelo VRP, es necesario recalcar que, según los resultados del modelo de localización, se estableció la apertura de 5 y 8 plantas de procesamiento respectivamente en cada instancia. Adicionalmente, se configuró una estrategia de clusterización que indica que pozos serán atendidos por cada planta de procesamiento. Por lo tanto, se realizará la división del problema de ruteo de vehículos para el campo Orito en 5 subproblemas de ruteo de vehículos VRP para la instancia 1 y 8 subproblemas de ruteo de vehículos VRP para la instancia 2, la tabla 11 muestra un comparativo del desempeño de las soluciones encontradas por cada modelo (VRP y MDVRP) con respecto al óptimo que determina el software comercial utilizado.

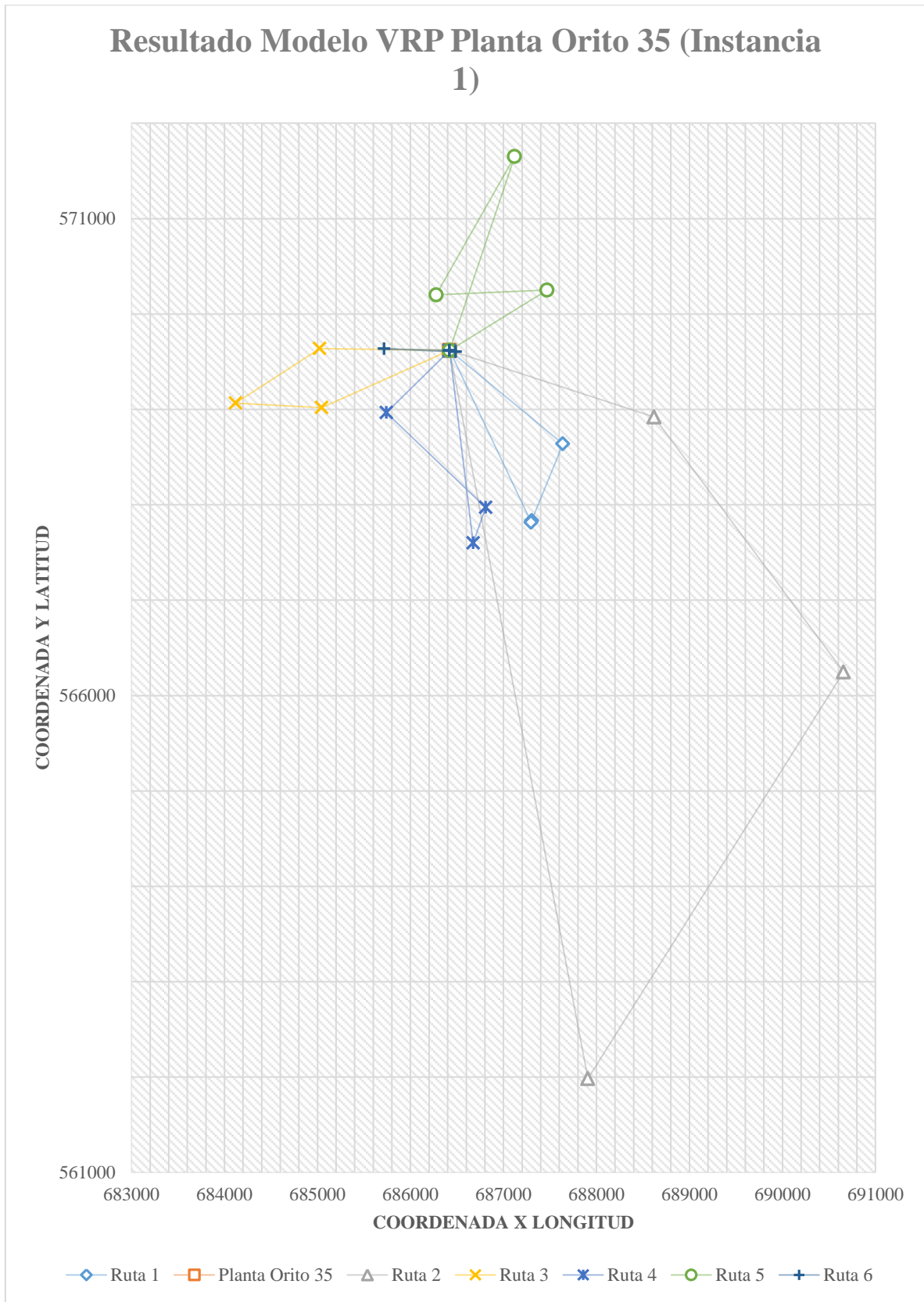


Ilustración 11 Resultado Modelo VRP Planta Orito 35 (Instancia 1)

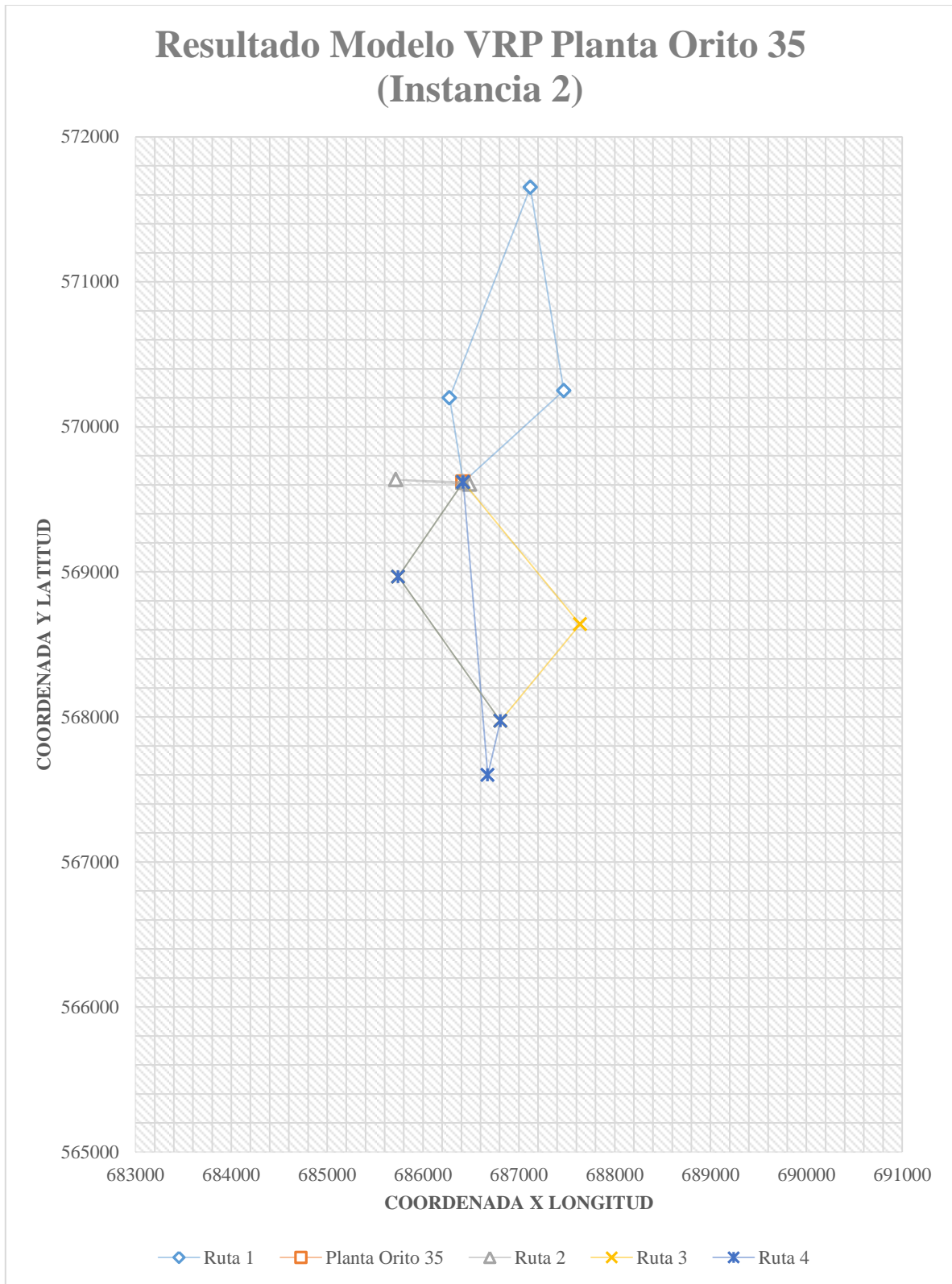


Ilustración 12 Resultado Modelo VRP Planta Orito 35 (Instancia 2)

Tabla 11 Comparación resultados modelos de ruteo de vehículos.

INSTANCIA 1						INSTANCIA 2					
Modelo	Planta No	Nombre Planta	Costo de Transporte 2 [USD/día]	Diferencia Relativa gap [%]	Tiempo de Corrida [Seg]	Modelo	Planta No	Nombre Plantas	Costo de Transporte 2 [USD/día]	Diferencia Relativa gap [%]	Tiempo de Corrida [Seg]
VRP	1	ORITO-26	83	39	3600	VRP	1	ORITO-12	49	1	812
	2	ORITO-35	62	55	3600		2	ORITO-31D	1	1	3489
	3	ORITO-69	94	45	3600		3	ORITO-35	57	1	4
	4	ORITO-73	135	25	3600		4	ORITO-47	40	1	1575
	5	ORITO-99	135	11	3600		5	ORITO-58	85	1	3831
							6	ORITO-71	32	1	86
					7		ORITO-77	32	1	20	
					8		ORITO-91	38	1	36	
VRP TOTAL			509	35	18.000	VRP TOTAL			334	1	9.853
MDVRP	Global	Global	1.133	74	18.000	MDVRP	Global	Global	No Encontrados	No Encontrados	18.000

Costo Transporte 2: Costo diario de transportar el GAP hacia cada planta desde todos sus pozos asignados (Ver Ilustración 9).

NOTA: las rutas diseñadas por los diferentes modelos de ruteo se muestran en los **Anexos No 4 y 5.**

4.4.3. Estimación Financiera

Con base en los resultados obtenidos, es claro que existe una mayor reducción en los costos de transporte obtenidos con la estrategia de clusterización y subdivisión del problema en 8 VRP (Instancia 2). Por ende, con el interés de estimar el desempeño económico de la solución planteada en este proyecto, se realiza la siguiente estimación del flujo de caja con base en los resultados obtenidos a partir de los modelos de localización y VRP en la instancia número 2, es decir 8 plantas con capacidad de procesamiento 1'000.000 de pies cúbicos al día y la misma cantidad de modelos VRP.

Ahora bien, como se expresó en el capítulo anterior, la decisión de abrir o no plantas de procesamiento es de orden estratégico, por lo tanto, el panorama de proyección será de 5 años para alinear los resultados con la estimación realizada por la Unidad de Planeación Minero Energética, (2016) que ha previsto escases de abastecimiento de gas natural para el año 2023. Por su parte, el precio del diésel será de \$2,55 por galón, según el promedio de los valores transaccionales para este commodity durante el 2017. (Energy Information Administration, 2017).

La tabla número 12 muestra el resumen y origen de los resultados económicos determinados en la instancia 2 del problema de localización y ruteo de vehículos del campo Orito aplicando múltiples VRP. Por otra parte, la tabla número 13 muestra la estimación financiera del rendimiento económico del sistema propuesto para el campo Orito según los resultados de la tabla 12, donde los ingresos se calculan a través de la venta del Diésel producido por la transformación del GAP generado en el campo Orito.

Tabla 12 Resumen de resultados de los modelos de localización y ruteo de vehículos

Ítem	Valor	Comentario	Origen Matemático	Modelo	Instancia
Costo de Captar el GAP	\$ 2.426	USD/día	$\sum_i Cact * S_i$	Localización	2
Cantidad de Plantas	8	unidades	$\sum_j Y_j$	Localización	2
Costo Total Plantas GPP	\$ 156.000.000	USD	$\sum_j Y_j$	Localización	2
Diésel Producido	58.212	Galones/día	$\sum_i 3.57 * S_i / 1000$	Localización	2
Costo de Producción	\$ 1.532	USD/día	$\sum_i Cop * S_i$	Localización	2
Costo de Transporte 1	\$ 3.948	USD/día	$\sum_i \sum_j 2 * Ctrans * Q_{ij} * d_{ij}$	Localización	2
Costo de Transporte 2	\$ 333	USD/día	$\sum_i \sum_j trans * C_{ij} * X_{ij}$	VRP	2

Tabla 13 Estimación de financiera del sistema de la solución propuesta

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	TOTALES
Ingresos /Galones						
Volumen de Diésel Producido a partir de GAP [Galón]	21.247.380	21.247.380	21.247.380	21.247.380	21.247.380	106.236.900
Cotización Internacional Diésel [USD/Galón]	\$2,55	\$2,55	\$2,55	\$2,55	\$2,55	
Valor Agregado al GAP [USD]	\$54.180.819	\$54.180.819	\$54.180.819	\$54.180.819	\$54.180.819	\$270.904.095
Total Ingresos Por Ventas	\$54.180.819	\$54.180.819	\$54.180.819	\$54.180.819	\$54.180.819	\$270.904.095
EGRESOS						
Volumen GAP Procesado [Ft3]	2.529.450.000	2.529.450.000	2.529.450.000	2.529.450.000	2.529.450.000	12.647.250.000
Costo Captación GAP [USD/Ft3]	\$885.308	\$885.308	\$885.308	\$885.308	\$885.308	\$4.426.538
Costo Transporte [USD]	\$1.562.497	\$1.562.497	\$1.562.497	\$1.562.497	\$1.562.497	\$7.812.487
Costo Procesamiento [USD]	\$559.008	\$559.008	\$559.008	\$559.008	\$559.008	\$2.795.042
Costo Capital [USD]	\$156.000.000					\$156.000.000
Total Egresos	\$159.006.813	\$3.006.813	\$3.006.813	\$3.006.813	\$3.006.813	\$171.034.066
TOTAL COSTOS	\$159.006.813	\$3.006.813	\$3.006.813	\$3.006.813	\$3.006.813	
SALDO INICIAL	\$0	-\$104.825.994	-\$53.651.989	-\$2.477.983	\$48.696.023	
SALDO AÑO	-\$104.825.994	\$51.174.006	\$51.174.006	\$51.174.006	\$51.174.006	
SALDO FINAL	-\$104.825.994	-\$53.651.989	-\$2.477.983	\$48.696.023	\$99.870.029	
VPN (5%)	\$72.985.235					

Por último, con la intención de conocer el impacto de cada una de las variables que afectan el desempeño económico de la estrategia de solución seleccionada, se propone el siguiente análisis de sensibilidad que busca determinar el cambio porcentual del VPN, cuando en la operación ocurre una variación del 1% en cada uno de dichos factores separadamente. La ilustración 13 muestra como los elementos más importantes a tener en cuenta dentro de la operación del sistema son “Volumen de Diésel Producido”, “Cotización Internacional del Diésel” y el “Costo Capital de Comprar las Plantas de Procesamiento”. Donde, por ejemplo, se puede apreciar que un cambio equivalente al 1% en el volumen del diésel producido a partir de GAP, impactará en una razón equivalente a 3% al VPN.

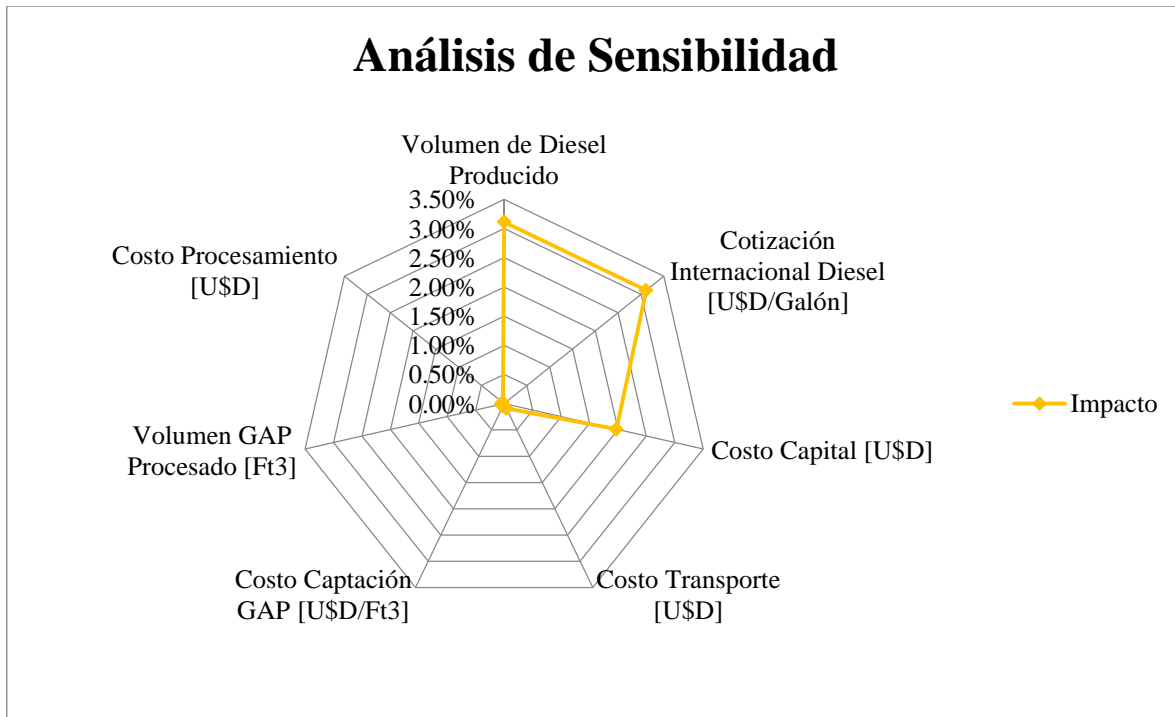


Ilustración 13 Análisis de Sensibilidad Flujo de Caja

4.5. Conclusiones del caso de estudio

Como se pudo observar, la complejidad de los modelos MDVRP es mayor que la de los planteamientos VRP. Por lo tanto, si se desea resolver este tipo de problema por medio de formulaciones exactas, resulta más provechoso reducir la complejidad del problema por medio de implementar procedimientos de clusterización y la posterior subdivisión del problema de ruteo en VRP imples.

Aunque al implementar la matriz de asignación de vehículos a las plantas, se permite de una manera sencilla lograr que los vehículos tengan rutas cerradas reduciendo la complejidad del modelo. Por su magnitud, el modelo de ruteo MDVRP propuesto no logra obtener ninguna solución factible en un periodo menor a 72 horas de corrida en el software GAMS IDE, por lo tanto, es necesario disminuir la dificultad del problema de ruteo a través de la interpretación de los resultados del modelo de localización.

El enfoque de las dos estrategias de ruteo de vehículos busca minimizar el costo de transporte, sin embargo, teniendo en cuenta los recursos computacionales disponibles y la complejidad del caso de estudio, la estrategia de subdividir el problema de ruteo en varios VRP resulta más eficiente al momento de encontrar soluciones factibles al problema.

Después de analizar el comportamiento del flujo de caja estimado, se encuentra un buen desempeño económico del sistema, sin embargo, es pertinente presentar en futuras investigaciones el impacto de factores adicionales como cargas salariales y costos de mantenimiento de los equipos. Ahora bien, cabe resaltar que también existen factores que pueden mejorar significativamente la viabilidad de un proyecto de este tipo como lo son, las iniciativas globales por impulsar futuras

regulaciones ambientales que impidan cualquier tipo de quema o liberación de este tipo de recurso energético.

Por último, no se puede eliminar del panorama el hecho de que esta investigación solo se enfocó en el GAP que es actualmente quemado en el campo Orito, en este orden de ideas, partiendo de los resultados del análisis de sensibilidad realizado, si añadiésemos al sistema el GAP que es liberado al ambiente sin ser quemado, el valor añadido a la propuesta podría representar un incremento significativo al VPN del proyecto.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

5.1. Conclusiones

Existe un amplio número de estudios enfocados en la definición de redes de distribución en escenarios donde la infraestructura está previamente establecida, no obstante, los campos petroleros son escenarios de riesgo, alta incertidumbre y restrictivos. De acuerdo a los estudios analizados y reportados en la revisión de literatura, las técnicas de optimización son una herramienta robusta para estudiar el tipo de problema abordado en este trabajo de grado.

De acuerdo a lo anterior, en este trabajo de grado se presenta un método jerárquico de dos etapas fundamentado en técnicas de optimización. El enfoque de solución propuesto es innovador, ya que no se conoce de registro de proyectos que estén aplicando este tipo de investigación para reducir los costos operativos en proyectos de aprovechamiento y transformación del GAP en campos petroleros.

Ahora bien, aunque los resultados del modelo de localización en conjunto con múltiples modelos VRP mostraron mejores resultados para el caso aplicado en esta investigación, no se puede concluir que esta estrategia es mejor que optar por construir un único modelo MDVRP, dado que este último podrían encontrar mejores soluciones en instancias más pequeñas gracias a su concepción holística. Por lo tanto, las dos estrategias planteadas son herramientas que el tomador de decisiones podrá considerar según las características de su problema a resolver.

Es importante resaltar que la solución encontrada respeta las restricciones del problema considerando las particularidades del mismo. Los resultados obtenidos por el modelo de localización y ruteo presentan gaps de al menos 8% con respecto a la cota inferior calculada por el optimizador comercial CPLEX en tiempos de ejecución menores a 1 día. De acuerdo a lo anterior, se infiere que el método planteado podría considerarse como una herramienta estructurada y práctica para soportar la toma de decisiones en escenarios realistas.

La aplicación industrial de la propuesta realizada en este trabajo podría considerarse como un modelo de operación sostenible para la industria petrolera. Ya que su implementación evitaría la quema de al menos 2.500 millones de pies cúbicos de GAP al año en campos con producción similar a la del campo Orito, dando pie a la monetización del GAP a través de los productos generados por procesamiento del mismo. En materia ambiental, extrapolar los resultados encontrados por Emam, (2015) se impediría la liberación al ambiente aproximadamente 7 billones de toneladas de CO₂ anualmente en conjunto a productos de la combustión como óxidos de nitrógeno, carbono y azufre (NO_x, CO₂, CO, SO_x), material particulado, hidrocarburos, oxidantes fotoquímicos, sulfuro de hidrógeno y hasta 250 toxinas, incluyendo agentes cancerígenos como benzopireno, benceno y tolueno. También, metales como mercurio, arsénico y cromo, los cuales a su vez son precursores de lluvias ácidas, pérdida de fertilidad en suelos etc. (Aliabadi & Shamekhi, 2012).

Teniendo en cuenta que las distancias entre los nodos de producción del campo Orito son cortas, además de que la solución propuesta puede resultar atractiva a la industria, este modelo podría utilizarse también como estrategia de mitigación de la inversión en infraestructura y costos operativos en etapas tempranas durante el desarrollo de proyectos de utilización de plantas de procesamiento de GAP con transporte a través de gasoducto.

Con respecto a los factores necesarios para la formulación de las propuestas de solución, se pudo encontrar según el caso aplicado que la construcción de los modelos de localización y ruteo deben incluir factores como las distancias entre nodos y sus tasas de producción, costos de inversión para compra de infraestructura, costos variables de captación, transporte y procesamiento del GAP, por último restricciones con respecto a las capacidades de carga de la flota vehicular y capacidad de la red de procesamiento instalada.

Por la naturaleza de la formulación de los modelos propuestos en este trabajo, el tomador de decisiones puede incluir en su parametrización la caracterización de sistemas cuyas tasas de producción, procesamiento y capacidades de transporte de los vehículos sean heterogéneas, siempre y cuando estos parámetros sean establecidos inicialmente como información de entrada para el caso o instancia de aplicación.

5.2. Perspectivas de Investigación.

Si bien es cierto que la aplicación de metodologías heurísticas y meta heurísticas en la solución de problemas de gran tamaño han demostrado buenos resultados en tiempos de corrida menor a un día generando gran aceptación dentro de la comunidad científica hacia los modelos de este tipo. Formulaciones exactas como las aquí propuestas han probado ser capaces de obtener resultados más cercanos a los óptimos con tiempos de corrida de orden de días de computación. Por otra parte, con respecto a las metodologías utilizadas en la actualidad por el sector Oil & Gas, existe la necesidad de aplicar estudios de este tipo a casos reales con la intención de reducir significativamente los costos operativos y de inversión de las compañías operadoras.

Trayendo a colación las capacidades de procesamiento computacional con la que se realizó el estudio, si se desea resolver problemas de este tipo en instancias con mayor complejidad donde la interpretación de los datos y resultados no permitan la obtención de buenas soluciones en tiempos comprendidos entre un día hasta una semana de computación, se debe considerar la utilización de modelos matemáticos heurísticos y metaheurísticos como mecanismos de optimización.

De acuerdo al estudio realizado y a los resultados obtenidos se determinan diferentes oportunidades de investigaciones que se podrían incorporar a la herramienta de solución presentada. Según lo visto en la revisión de la literatura al optar por flotas y sistemas de plantas homogéneas se logran resultados sub óptimos (Fiorot, Alvarenga, y Rosa 2016), para mejorar este aspecto se podría estudiar cómo el problema de localización y ruteo de vehículos con instalaciones y flota heterogéneas podría impactar los resultados del método de solución. Por otra parte, con la implementación de parámetros como capacidad de almacenamiento en los pozos de producción, costos asociados a pérdidas de producción por demoras en los recorridos y ventanas de tiempo, cuantificación del impacto ambiental causado por quemar y liberar el GAP al ambiente incrementarían la relevancia del modelo como herramienta de decisión a nivel operativo. En particular, de acuerdo a la revisión de la literatura se ha determinado que estas características se podrían enmarcar dentro de la combinación entre los problemas de localización y ruteo de vehículos con flota heterogénea (Location Routing Problem with Heterogeneous Fleet – LRPH), el problema de localización y ruteo con ventanas de tiempo (Location Routing Problem with Time Windows – LRPTW) y un nuevo problema de localización con instalaciones heterogéneas.

Por último, expandiendo el panorama de investigación, el diseño de modelos de programación matemática que minimicen los costos de operación en redes estacionarias de transporte de GAP a través de gasoducto, podrían representar una segunda etapa de desarrollo del problema evaluado

anteriormente. Lo anterior plantearía un trade-off interesante entre los costos operativos y los costos de capital en horizontes de planeación de mediano y largo plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2017). Estadísticas de Producción. Recuperado Julio 7, 2017, de <http://www.anh.gov.co/Operaciones-Regalias-y-Participaciones/Sistema-Integrado-de-Operaciones/Paginas/Estadisticas-de-Produccion.aspx>
- Agencia Nacional de Hidrocarburos - Colombia. (2016). *Shape de pozos 2015 Agencia Nacional de Hidrocarburos - Colombia*. Recuperado de <http://www.anh.gov.co/Paginas/inicio/defaultANH.aspx>
- Ahmadi, A., & Seddighi, A. H. (2013). A location-routing problem with disruption risk. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 53(1), 63–82.
- Al-Mudhafar, W. J., Al-Jawad, M. S., & Al-Shamma, D. A. (2010). Using optimization techniques for determining optimal locations of additional oil wells in South Rumaila oil field. *Society of Petroleum Engineers - International Oil and Gas Conference and Exhibition in China 2010, IOGCEC*, 1(SPE 130054), 159–178.
- Alexander, B., & Sergey, S. (2014). A Metaheuristic Approach for the Problem of Motor Fuel Distribution. *Procedia Computer Science*, 31(Itqm), 143–150.
- Aliabadi, A., & Shamekhi, A. (2012). Recent Developments in Gas Flaring and Venting Reduction. In *SPE 152024*.
- Alumur, S., & Kara, B. Y. (2007). A new model for the hazardous waste location-routing problem. *Computers and Operations Research*, 34(5), 1406–1423.
- Ambrosino, D., Sciomachen, A., & Scutellà, M. G. (2009). A heuristic based on multi-exchange techniques for a regional fleet assignment location-routing problem. *Computers and Operations Research*, 36(2), 442–460.
- Anghinolfi, D., Paolucci, M., & Tonelli, F. (2016). A Vehicle Routing Problem with Time Windows Approach for Planning Service Operations in Gas Distribution Network of a Metropolitan Area. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 1365–1370.
- Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C. a., & Martínez, J. F. (2007). *Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal*. Agencia Nacional de Hidrocarburos - A.N.H.-. Agencia Nacional de Hidrocarburos. <https://doi.org/ISBN: 978-958-98237-0-5>
- Barreto, S., Ferreira, C., Paixão, J., & Santos, B. S. (2007). Using clustering analysis in a capacitated location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 968–977. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.06.074>
- Biobaku, T., Lim, G., Cho, J., Parsaei, H., & Kim, S. (2015). Liquefied Natural Gas Ship Route Planning: A Risk Analysis Approach. *Procedia Manufacturing*, 3, 1319–1326.
- Blanquero, R., Carrizosa, E., Boglárka, G., & Nogales-gómez, A. (2016). p -facility Huff location problem on networks. *European Journal of Operational Research*, 255(1), 34–42.
- Bozorgi-Amiri, A., & Khorsi, M. (2016). A dynamic multi-objective location-routing model for relief logistic planning under uncertainty on demand, travel time, and cost parameters. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85(5–8), 1633–1648.
- Caballero, R., González, M., Guerrero, F. M., Molina, J., & Paralera, C. (2007). Solving a

- multiobjective location routing problem with a metaheuristic based on tabu search. Application to a real case in Andalusia. *European Journal of Operational Research*, 177(3), 1751–1763.
- Chbichib, A., Mellouli, R., & Chabchoub, H. (2012). Profitable Vehicle Routing Problem with Multiple Trips: Modeling and Variable Neighborhood Descent Algorithm. *American Journal of Operational Research*, 2(6), 104–119.
- Coelho, V. N., Grasas, A., Ramalhinho, H., Coelho, I. M., Souza, M. J. F., & Cruz, R. C. (2016). An ILS-based algorithm to solve a large-scale real heterogeneous fleet VRP with multi-trips and docking constraints. *European Journal of Operational Research*, 250(2), 367–376.
- Coutinho-Rodrigues, J., Tralhão, L., & Alçada-Almeida, L. (2012). Solving a location-routing problem with a multiobjective approach: The design of urban evacuation plans. *Journal of Transport Geography*, 22, 206–218.
- de Camargo, R. S., de Miranda, G., & Løkketangen, A. (2013). A new formulation and an exact approach for the many-to-many hub location-routing problem. *Applied Mathematical Modelling*, 37(12–13), 7465–7480.
- Drexl, M., & Schneider, M. (2015). A survey of variants and extensions of the location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 241(2), 283–308.
- Elvidge, C. D., Baugh, K. E., Tuttle, B. T., Howard, A. T., Pack, D. W., Milesi, C., & Erwin, E. H. (2007). A twelve year record of national and global gas flaring volumes estimated using satellite data. Recuperado de http://siteresources.worldbank.org/INTGGFR/Resources/DMSP_flares_20070530_b-sm.pdf
- Emam, E. A. (2015). Gas Flaring in Industry: an Overview. *Petroleum & Coal*, 57(5), 532–555.
- Energy Information Administration. (2017). U.S. No 2 Diesel Retail Prices. Recuperado Julio 26, 2017, de https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=EMD_EPD2D_PTE_NUS_DPG&f=W
- Escobar, J. W., Linfati, R., Baldoquin, M. G., & Toth, P. (2014). A Granular Variable Tabu Neighborhood Search for the capacitated location-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 67, 344–356.
- Fazel Zarandi, M. H., Hemmati, A., Davari, S., & Burhan Turksen, I. (2013). Capacitated location-routing problem with time windows under uncertainty. *Knowledge-Based Systems*, 37, 480–489.
- Fernandez Cuesta, E., Andersson, H., Fagerholt, K., & Laporte, G. (2017). Vessel routing with pickups and deliveries: An application to the supply of offshore oil platforms. *Computers and Operations Research*, 79(March 2016), 140–147.
- Fiorot, H., Alvarenga, R. De, & Rosa, A. L. da S. (2016). Planning The Diesel Supply For Offshore Platforms By A Mathematical Model Based On The Vehicle Routing Problem With Replenishment. *Transportation Research Procedia*, 18(June), 11–18.
- Gao, J., He, C., & You, F. (2017). Shale Gas Process and Supply Chain Optimization. In *Advances in Energy Systems Engineering* (Vol. 1, pp. 21–46).
- Gao, S., Wang, Y., Cheng, J., Inazumi, Y., & Tang, Z. (2016). Ant colony optimization with clustering for solving the dynamic location routing problem. *Applied Mathematics and*

Computation, 285, 149–173.

- Guerrero, W. J., Prodhon, C., Velasco, N., & Amaya, C. A. (2013). Hybrid heuristic for the inventory location-routing problem with deterministic demand. *International Journal of Production Economics*, 146(1), 359–370.
- Hanczar, P. (2012). A Fuel Distribution Problem – Application of New Multi-item Inventory Routing Formulation. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 54, 726–735.
- Hashemi Doulabi, S. H., & Seifi, A. (2013). Lower and upper bounds for location-arc routing problems with vehicle capacity constraints. *European Journal of Operational Research*, 224(1), 189–208.
- He, Z., Khatu, G., Tenenbaum, E., Li, W., & Han, Z. (2016). Flared Gas Monetization with Modular Gas-to-Liquid Units: Oilfield Conversion of Associated Gas into Petrol at Small-Scales. In *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference SPE-183510-MS*.
- Hernandez, F., Feillet, D., Giroudeau, R., & Naud, O. (2016). Branch-and-price algorithms for the solution of the multi-trip vehicle routing problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 249(2), 551–559.
- Karaoglan, I., & Altıparmak, F. (2015). A memetic algorithm for the capacitated location-routing problem with mixed backhauls. *Computers and Operations Research*, 55, 200–216.
- Karaoglan, I., Altıparmak, F., Kara, I., & Dengiz, B. (2011). A branch and cut algorithm for the location-routing problem with simultaneous pickup and delivery. *European Journal of Operational Research*, 211(2), 318–332.
- Karaoglan, I., Altıparmak, F., Kara, I., & Dengiz, B. (2012). The location-routing problem with simultaneous pickup and delivery: Formulations and a heuristic approach. *Omega*, 40(4), 465–477.
- Koc, Ç. (2016). A unified-adaptive large neighborhood search metaheuristic for periodic location-routing problems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 68, 265–284.
- Kovacs, A. A., Parragh, S. N., & Hartl, R. F. (2015). The multi-objective generalized consistent vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 247(2), 441–458.
- Li, J., Chu, F., & Prins, C. (2009). Lower and upper bounds for a capacitated plant location problem with multicommodity flow. *Computers & Operations Research*, 36, 3019–3030.
- Li, Y., Hu, G., & Wright, M. M. (2015). An optimization model for sequential fast pyrolysis facility location-allocation under renewable fuel standard. *Energy*, 93, 1165–1172.
- Linfati, R., Escobar, J. W., & Gatica, G. (2014). A Metaheuristic Algorithm for the Location Routing Problem with Heterogeneous Fleet. *Ingeniería y Ciencia*, 10(19), 55–76.
- Lopes, R. B., Ferreira, C., Santos, B. S., & Barreto, S. (2013). A taxonomical analysis, current methods and objectives on location-routing problems. *International Transactions in Operational Research*, 20(6), 795–822.
- Lopes, R. B., Plastria, F., Ferreira, C., & Santos, B. S. (2014). Location-arc routing problem: Heuristic approaches and test instances. *Computers and Operations Research*, 43, 309–317.
- López, E., Akhavan, R., Dieulle, L., Labadie, N., & Medaglia, A. L. (2016). On the combined maintenance and routing optimization problem. *Reliability Engineering and System Safety*, 145, 199–214.

- Marín, A., Nickel, S., Puerto, J., & Velten, S. (2009). A flexible model and efficient solution strategies for discrete location problems. *Discrete Applied Mathematics*, 157(157), 1128–1145.
- Markov, I., Varone, S., & Bierlaire, M. (2016). Integrating a heterogeneous fixed fleet and a flexible assignment of destination depots in the waste collection VRP with intermediate facilities. *Transportation Research Part B: Methodological*, 84, 256–273.
- Martínez, I. A., Molina, J., Ángel, F., Gómez, T., & Caballero, R. (2014). Solving a bi-objective Transportation Location Routing Problem by metaheuristic algorithms. *European Journal of Operational Research*, 234, 25–36.
- Motherwell, J., & Weinbel, C. (2014). Facility siting and routing with a focus on sustainability. In *SPE International Conference on Health, Safety and Environment 2014: The Journey Continues*. SPE 168534 Facility. Recuperado de <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84905860521&partnerID=40&md5=247a7320ef56ac02265bc4cb3261d9b7>
- Mousavi, S. M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). A hybrid simulated annealing algorithm for location and routing scheduling problems with cross-docking in the supply chain. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(2), 335–347.
- Ocampo, E. M. T., Castaño, A. H. D., & Zuluaga, A. H. E. (2016). Desempeño de las técnicas de agrupamiento para resolver el problema de ruteo con múltiples depósitos. *Tecno Lógicas*, 19(36), 49–62.
- Pérez, C. E. T., & Flores, J. L. M. (n.d.). Revisión y programación de modelos de optimización como una plataforma en GAMS-CPLEX para problemas de ruteo de vehículos .
- PFC Energy. (2007). *Using Russia's Associated Gas: Prepared for the Global Gas Flaring Reduction Partnership and the World Bank*.
- Prodhon, C. (2011). A hybrid evolutionary algorithm for the periodic location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 210(2), 204–212.
- Prodhon, C., & Prins, C. (2014). A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 1–17.
- Qian, J., & Eglese, R. (2016). Fuel emissions optimization in vehicle routing problems with time-varying speeds. *European Journal of Operational Research*, 248(3), 840–848.
- Rajović, V., Kiss, F., Maravić, N., & Bera, O. (2016). Environmental flows and life cycle assessment of associated petroleum gas utilization via combined heat and power plants and heat boilers at oil fields. *Energy Conversion and Management*, 118, 96–104.
- Rakke, J. G., Stålhane, M., Moe, C. R., Christiansen, M., Andersson, H., Fagerholt, K., & Norstad, I. (2011). A rolling horizon heuristic for creating a liquefied natural gas annual delivery program. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(5), 896–911.
- Ramírez, E. Á., Torres, J. R. M., & Muñoz, A. F. (2016). *MODELO DE RUTEO PARA LA RECOLECCIÓN DE MUESTRA DE FLUIDO DE POZO EN CAMPO QUIFA – META COLOMBIA*.
- Razali, N. M. (2015). An Efficient Genetic Algorithm for Large Scale Vehicle Routing Problem Subject to Precedence Constraints. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, 1922–1931.

- Rieck, J., Ehrenberg, C., & Zimmermann, J. (2014). Many-to-many location-routing with inter-hub transport and multi-commodity pickup-and-delivery. *European Journal of Operational Research*, 236(3), 863–878.
- Riquelme, J. P., Gamache, M., & Langevin, A. (2016). Location arc routing problem with inventory constraints. *Computers and Operations Research*, 76, 84–94.
- Rocha, R., Grossmann, I. E., & Poggi de Aragão, M. V. S. (2009). Petroleum allocation at PETROBRAS: Mathematical model and a solution algorithm. *Computers and Chemical Engineering*, 33(12), 2123–2133.
- Rodina, A. (2016). Burning through : reducing associated petroleum gas flaring to enhance natural. *Law In Transition Journal*, 83–91.
- Rodríguez-Martín, I., Salazar-González, J. J., & Yaman, H. (2014). A branch-and-cut algorithm for the hub location and routing problem. *Computers and Operations Research*, 50, 161–174.
- Rosa, R. de A., Machado, A. M., Ribeiro, G. M., & Mauri, G. R. (2016). A mathematical model and a Clustering Search metaheuristic for planning the helicopter transportation of employees to the production platforms of oil and gas. *Computers and Industrial Engineering*, 101, 303–312.
- Salhi, S., Imran, A., & Wassan, N. A. (2014). The multi-depot vehicle routing problem with heterogeneous vehicle fleet: Formulation and a variable neighborhood search implementation. *Computers and Operation Research*, 52, 315–325.
- Samanlioglu, F. (2013). A multi-objective mathematical model for the industrial hazardous waste location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 226(2), 332–340.
- Shishebori, D., Dayarian, I., Jabbarzadeh, A., & Barzinpour, F. (2014). A new hybrid approach to discrete multiple facility location problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(1–4), 127–139.
- Siddiqui, A. W., & Verma, M. (2015). A bi-objective approach to routing and scheduling maritime transportation of crude oil. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 37, 65–78.
- Tan, S. H., & Barton, P. I. (2015). Optimal dynamic allocation of mobile plants to monetize associated or stranded natural gas, part I: Bakken shale play case study. *Energy*, 93, 1581–1594.
- The World Bank. (2015). *Regional Gas Seminar*. Maputo. Recuperado de <http://docplayer.net/42912426-Global-initiative-combining-forces-to-end-routine-gas-flaring.html>
- The World Bank. (2016). *Global Gas Flaring Reduction*. World Bank Group. Washington. Recuperado de <http://documents.worldbank.org/curated/en/590561468765565919/pdf/295540Regulati1aring0no10301public1.pdf>
- Ting, C. J., & Chen, C. H. (2013). A multiple ant colony optimization algorithm for the capacitated location routing problem. *International Journal of Production Economics*, 141(1), 34–44.
- Tunalıoğlu, R., Koç, Ç., & Bektaş, T. (2016). A multiperiod location-routing problem arising in the collection of Olive Oil Mill Wastewater. *Journal of the Operational Research Society*, 67(7), 1–13.

- Unidad de Planeación Minero Energética. (2015a). *Plan energetico nacional colombia : ideario energetico 2050*. Bogotá. Recuperado de http://www.upme.gov.co/docs/pen/pen_idearioenergetico2050.pdf
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2015b). *Plan Indicativo de Abastecimiento de Gas Natural*. Recuperado de http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/Plan_Indicativo_Gas_Natural_2015.pdf
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2016). Consulta Series de Tiempo. Recuperado March 21, 2017, de http://www.upme.gov.co/generadorconsultas/Consulta_Series.aspx?idModulo=3&tipoSerie=138
- United States Energy Information Administration. (2016). *Trends in US Oil and Natural Gas Upstream Costs*.
- Universidad Nacional de Colombia. Grupo de Investigación en Geofísica., J. G., Guerrero, J. G., Vargas, C. A., & Montes, L. (2010). *Earth sciences research journal. Earth Sciences Research Journal* (Vol. 14). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias, Grupo de Investigación en Geofísica.
- Venkata Narasimha, K., Kivelevitch, E., Sharma, B., & Kumar, M. (2013). An ant colony optimization technique for solving min-max Multi-Depot Vehicle Routing Problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, 13, 63–73.
- Wood, D. A. (2016). Evolutionary memetic algorithms supported by metaheuristic profiling effectively applied to the optimization of discrete routing problems. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 35, 997–1014.
- Yildiz, B., Arslan, O., & Karaşan, O. E. (2016). A branch and price approach for routing and refueling station location model. *European Journal of Operational Research*, 248(3), 815–826.
- You, P. S., & Hsieh, Y. C. (2012). A heuristic approach to a single stage assembly problem with transportation allocation. *Applied Mathematics and Computation*, 218(22), 11100–11111.
- Yu, V. F., Lin, S. W., Lee, W., & Ting, C. J. (2010). A simulated annealing heuristic for the capacitated location routing problem. *Computers and Industrial Engineering*, 58(2), 288–299.
- Zhang, J., Zhao, Y., Xue, W., & Li, J. (2015). Vehicle routing problem with fuel consumption and carbon emission. *International Journal of Production Economics*, 170, 234–242.
- Zhao, J., & Verter, V. (2015). A bi-objective model for the used oil location-routing problem. *Computers and Operations Research*, 62, 157–168.

ANEXOS

Anexo 1 Coordenadas X, Y de pozos campo Orito

Tabla 14 Las coordenadas X y de los pozos fueron tomadas de la Agencia Nacional de Hidrocarburos - Colombia, (2016).

Nombre del Pozo	Coordenada X Longitud	Coordenada Y Latitud
SUR-1	686.679	554.391
1	688.574	566.846
1 HST	687.070	566.500
1H	687.070	566.500
2	688.405	566.235
3	687.422	566.013
4	689.423	564.048
5	687.469	570.250
6	688.619	568.920
7	690.532	564.943
8	688.019	565.350
9	688.530	563.980
10	686.486	569.604
11	690.697	565.747
12	687.560	565.880
13	688.528	563.035
14	687.639	568.639
15	689.387	569.059
16	689.659	564.672
17	689.488	567.762
18	687.601	562.892
19	686.971	565.288
20	689.683	563.593
21	685.024	569.638
22	689.471	567.785
23	689.345	562.604
24	684.120	569.067
25	688.049	564.344
26	688.121	566.393
27	687.090	564.317
28	688.557	563.847
29	688.945	564.359
30	688.082	563.278
31	689.134	563.354
31D	688.548	563.828
32	688.578	562.846
33	687.908	561.985
34	687.297	567.816
35	686.420	569.619
36	685.718	569.636
37	685.741	568.966
38	685.046	569.019
39	689.039	569.883
40	686.276	570.200
41	690.126	565.344
42	688.562	563.841
43	687.119	571.652
44	690.070	568.360
45	688.088	563.274
46	688.938	564.359
47	689.674	564.671
48	687.614	562.901
49	688.035	564.356
50	687.582	566.836
51	689.126	563.372
52	687.305	567.835
53	687.673	563.872
54	687.921	561.969
55	688.563	564.882
56	688.561	562.854
57	687.692	564.793
58	688.403	562.481
59	689.934	566.226
60	689.176	565.236
61	690.420	564.950
62	688.790	568.241
63	690.033	564.257
64	691.124	566.087
65	686.808	567.973
66	688.140	561.672
67	690.693	567.798
68	690.657	566.247
69	689.449	564.043
70	689.853	566.867
71	690.937	566.880
72	688.160	563.461
73	690.774	568.295
74	690.706	569.025
75	690.727	569.611
76	689.981	569.575
77	690.108	569.024
77A	690.095	569.015
78	687.140	567.265
80	687.664	565.510
81	688.100	564.800
82	686.675	567.599
83	690.699	570.242
84	691.600	568.940
85	691.220	567.520
86	690.871	567.324
87	690.774	566.511
88	690.743	565.205
89	691.082	568.706
90	688.565	563.861

91	688.797	567.057
92	691.165	567.981
93	687.140	567.260
94	687.463	562.417
95	688.685	566.566
96	690.551	564.469
97	689.015	563.748
98	688.671	563.196
99	688.037	562.715
100	688.431	566.946
101	689.020	567.424
102	689.048	566.774
103	690.812	566.000
104	690.992	567.671
105	689.084	563.650
106	687.528	562.912

Anexo 2 Matriz a(k,i) asignación de vehículos a las plantas.

Tabla 15 Matriz a(k,i) asignación de vehículos a las plantas.

Vehículo	Planta ORITO-26	Planta ORITO-69	Planta ORITO-73	Planta ORITO-99	Planta ORITO-35
Vehículo1	1	0	0	0	0
Vehículo2	1	0	0	0	0
Vehículo3	1	0	0	0	0
Vehículo4	1	0	0	0	0
Vehículo5	1	0	0	0	0
Vehículo6	1	0	0	0	0
Vehículo7	1	0	0	0	0
Vehículo8	1	0	0	0	0
Vehículo9	0	1	0	0	0
Vehículo10	0	1	0	0	0
Vehículo11	0	1	0	0	0
Vehículo12	0	1	0	0	0
Vehículo13	0	1	0	0	0
Vehículo14	0	1	0	0	0
Vehículo15	0	0	1	0	0
Vehículo16	0	0	1	0	0
Vehículo17	0	0	1	0	0
Vehículo18	0	0	1	0	0
Vehículo19	0	0	1	0	0
Vehículo20	0	0	1	0	0
Vehículo21	0	0	1	0	0
Vehículo22	0	0	1	0	0
Vehículo23	0	0	1	0	0
Vehículo24	0	0	0	1	0
Vehículo25	0	0	0	1	0
Vehículo26	0	0	0	1	0
Vehículo27	0	0	0	1	0
Vehículo28	0	0	0	1	0
Vehículo29	0	0	0	1	0
Vehículo30	0	0	0	1	0
Vehículo31	0	0	0	1	0
Vehículo32	0	0	0	0	1
Vehículo33	0	0	0	0	1
Vehículo34	0	0	0	0	1
Vehículo35	0	0	0	0	1
Vehículo36	0	0	0	0	1
Vehículo37	0	0	0	0	1
Vehículo38	0	0	0	0	1

Vehículo39	0	0	0	0	1
------------	---	---	---	---	---

Anexo 3 Resultados modelo Localización

Tabla 16 Resultados Modelo Localización Instancia 1

Planta	Asignación Pozos
ORITO 26	1, 2, 3, 8, 12, 19, 26, 50, 57, 59, 60, 62, 78, 80, 81, 91, 93, 95, 100, 101, 102, 1 HST, 1H
ORITO 35	5, 6, 10, 14, 21, 24, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 40, 43, 52, 65, 68, 82
ORITO 69	4, 7, 9, 11, 16, 20, 28, 29, 31, 41, 42, 46, 47, 51, 61, 63, 69, 88, 90, 96, 97, 105, 31D
ORITO 73	15, 17, 22, 39, 44, 64, 67, 70, 71, 73, 74, 75, 76, 77, 83, 84, 85, 86, 87, 89, 92, 104, 77A
ORITO 99	SUR1, 13, 18, 23, 25, 27, 30, 32, 45, 48, 49, 53, 54, 55, 56, 58, 66, 72, 94, 98, 99, 103, 106

Tabla 17 Resultados Modelo de Localización Instancia 2

Planta	Asignación Pozos
ORITO 12	3, 8, 12, 19, 26, 27, 50, 57, 78, 80, 81, 82, 93, 1HST, 1H
ORITO 31D	9, 25, 28, 30, 31, 42, 45, 49, 51, 53, 72, 90, 97, 105, 31D
ORITO 35	5, 10, 14, 21, 24, 35, 36, 37, 38, 40, 43, 65
ORITO 47	4, 7, 16, 20, 29, 41, 46, 47, 55, 60, 61, 63, 69, 88, 96
ORITO 58	Sur 1, 13, 18, 23, 32, 33, 48, 54, 56, 58, 66, 94, 98, 99, 106
ORITO 71	11, 59, 64, 67, 68, 71, 84, 85, 86, 92, 103, 104
ORITO 77	6, 15, 39, 44, 73, 74, 75, 76, 77, 83, 84, 89, 77A
ORITO 91	1, 2, 17, 22, 34, 52, 62, 70, 91, 95, 100, 101, 102

Anexo 4 Resultados modelo MDVRP

Tabla 18 Rutas generadas por el modelo de ruteo MDVRP. PLANTA ORITO 26. Variable X(i,j,k) en la instancia 1.

<i>i</i> (Inicio)	<i>j</i> (Destino)	Vehículo1	Vehículo2	Vehículo3	Vehículo4	Vehículo5	Vehículo6	Vehículo7	Vehículo8
Planta ORITO-26	42								1
Planta ORITO-26	53							1	
Planta ORITO-26	57		1						
Planta ORITO-26	77					1			
Planta ORITO-26	80						1		
Planta ORITO-26	91				1				
Planta ORITO-26	102	1							
Planta ORITO-26	12			1					
1	Planta ORITO-26			1					
2	Planta ORITO-26				1				
3	1			1					
26	Planta ORITO-26								1
28	Planta ORITO-26		1						
42	90								1
53	72							1	
57	97		1						
72	25							1	
76	26					1			
77	77A					1			
77A	76					1			
80	9						1		
88	11	1							
90	95								1
91	2				1				
95	26								1
97	28		1						
102	88	1							
9	31D						1		
11	Planta ORITO-26	1							
12	3			1					
25	Planta ORITO-26							1	
31D	Planta ORITO-26						1		

Tabla 19 Rutas generadas por el modelo de ruteo MDVRP. PLANTA ORITO 35. Variable X(i,j,k) en la instancia 1.

<i>i</i> (Inicio)	<i>j</i> (Destino)	Vehículo32	Vehículo33	Vehículo34	Vehículo35	Vehículo36	Vehículo37	Vehículo38	Vehículo39
Planta ORITO-35	SUR-1					1			
Planta ORITO-35	15		1						
Planta ORITO-35	17								1
Planta ORITO-35	39						1		
Planta ORITO-35	43							1	
Planta ORITO-35	10	1							
Planta ORITO-35	13				1				
Planta ORITO-35	36			1					
SUR-1	66					1			
5	Planta ORITO-35								1
14	Planta ORITO-35			1					
15	70		1						
17	59								1
29	46				1				
37	Planta ORITO-35						1		
38	Planta ORITO-35							1	
39	83						1		
40	38							1	
43	40							1	
46	Planta ORITO-35				1				
47	60	1							
59	5								1
60	Planta ORITO-35	1							
66	94					1			
70	22		1						
83	37						1		
94	Planta ORITO-35					1			
10	47	1							
13	29				1				
21	14			1					
22	Planta ORITO-35		1						
36	21			1					

Tabla 20 Rutas generadas por el modelo de ruteo MDVRP. PLANTA ORITO 69. Variable X(i,j,k) en la instancia 1.

<i>i</i> (Inicio)	<i>j</i> (Destino)	Vehículo9	Vehículo10	Vehículo11	Vehículo12	Vehículo13	Vehículo14
Planta ORITO-69	16					1	
Planta ORITO-69	29						1
Planta ORITO-69	41				1		
Planta ORITO-69	42		1				
Planta ORITO-69	51						
Planta ORITO-69	96						
Planta ORITO-69	97	1					
Planta ORITO-69	31D			1			
4	Planta ORITO-69		1				
16	47					1	
28	4		1				
29	46						1
41	11				1		
42	28		1				
46	Planta ORITO-69						1
47	63					1	
51	31						
61	Planta ORITO-69						
63	Planta ORITO-69					1	
88	Planta ORITO-69				1		
90	9			1			
96	7						
97	105	1					
105	Planta ORITO-69	1					
7	61						

Tabla 21 Rutas generadas por el modelo de ruteo MDVRP. PLANTA ORITO 73. Variable X(i,j,k) en la instancia 1.

Inicio (i)	Destino (j)	Vehículo 15	Vehículo 16	Vehículo 17	Vehículo 18	Vehículo 19	Vehículo 20	Vehículo 21	Vehículo 22	Vehículo 23
Planta ORITO-73	30					1				
Planta ORITO-73	44		1							
Planta ORITO-73	52				1					
Planta ORITO-73	67			1						
Planta ORITO-73	84									1
Planta ORITO-73	87							1		
Planta ORITO-73	103	1								
Planta ORITO-73	19								1	
Planta ORITO-73	32						1			
16	49							1		
27	69								1	
30	45					1				
44	24		1							
45	104					1				
49	Planta ORITO-73							1		
50	Planta ORITO-73				1					
52	34				1					
56	92						1			
64	89	1								
65	82									1
67	68			1						
68	71			1						
69	78								1	
71	Planta ORITO-73			1						
82	Planta ORITO-73									1
84	65									1
87	16							1		
89	Planta ORITO-73	1								
92	Planta ORITO-73						1			
103	64	1								
104	Planta ORITO-73					1				
78	Planta ORITO-73								1	
8	Planta ORITO-73		1							
19	27								1	
24	8		1							
32	56						1			
34	50				1					

Tabla 22 Rutas generadas por el modelo de ruteo MDVRP. PLANTA ORITO 99. Variable X(i,j,k) en la instancia 1.

Inicio (i)	Destino (j)	Vehículo24	Vehículo25	Vehículo26	Vehículo27	Vehículo28	Vehículo29	Vehículo30	Vehículo31
Planta ORITO-99	18				1				
Planta ORITO-99	48	1							
Planta ORITO-99	58			1					
Planta ORITO-99	86							1	
Planta ORITO-99	99						1		
Planta ORITO-99	100					1			
Planta ORITO-99	106								1
Planta ORITO-99	23		1						
18	Planta ORITO-99				1				
41	Planta ORITO-99							1	
48	Planta ORITO-99	1							
51	31		1						
58	Planta ORITO-99			1					
81	Planta ORITO-99					1			
85	41							1	
86	85							1	
99	Planta ORITO-99						1		
100	101					1			
101	81					1			
106	Planta ORITO-99								1
23	51		1						
31	Planta ORITO-99		1						

Anexo 5 Resultados modelos VRP

Tabla 23 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 26. Variable X(i,j,k) en la instancia 1.

		Vehículo1	Vehículo2	Vehículo3	Vehículo4	Vehículo5	Vehículo6	Vehículo7	Vehículo8
Planta ORITO-26	Planta ORITO-26								
Planta ORITO-26	2		1						
Planta ORITO-26	3	1							
Planta ORITO-26	26								
Planta ORITO-26	57					1			
Planta ORITO-26	91						1		
Planta ORITO-26	100								1
Planta ORITO-26	102				1				
Planta ORITO-26	78							1	
Planta ORITO-26	12			1					
1	Planta ORITO-26								1
1H	Planta ORITO-26	1							
1 HST	1H	1							
2	95		1						
3	1 HST	1							
26	Planta ORITO-26								
50	Planta ORITO-26							1	
57	81					1			
59	60				1				
60	Planta ORITO-26				1				
62	Planta ORITO-26						1		
80	Planta ORITO-26			1					
81	8					1			
91	101						1		
93	50							1	
95	Planta ORITO-26		1						
100	1								1
101	62						1		
102	59				1				
78	93							1	
8	Planta ORITO-26					1			
12	19			1					
19	80			1					

Tabla 24 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 35. Variable X(i,j,k) en la instancia 1.

Inicio (i)	Destino (j)	Vehículo1	Vehículo2	Vehículo3	Vehículo4	Vehículo5	Vehículo6
Planta ORITO-35	5	1					
Planta ORITO-35	14						1
Planta ORITO-35	37				1		
Planta ORITO-35	21		1				
Planta ORITO-35	35			1			
Planta ORITO-35	36					1	
5	43	1					
6	68			1			
14	52						1
37	82				1		
38	Planta ORITO-35		1				
40	Planta ORITO-35	1					
43	40	1					
52	34						1
65	Planta ORITO-35				1		
68	33			1			
82	65				1		
10	Planta ORITO-35					1	
21	24		1				
24	38		1				
33	Planta ORITO-35			1			
34	Planta ORITO-35						1
35	6			1			
36	10					1	

Tabla 25 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 69. Variable X(i,j,k) en la instancia 1.

Inicio (i)	Destino (j)	Vehículo1	Vehículo2	Vehículo3	Vehículo4	Vehículo5	Vehículo6	Vehículo7	Vehículo8
Planta ORITO-69	28								1
Planta ORITO-69	61					1			
Planta ORITO-69	63	1							
Planta ORITO-69	69							1	
Planta ORITO-69	96			1					
Planta ORITO-69	97				1				
Planta ORITO-69	20						1		
Planta ORITO-69	31D		1						
4	Planta ORITO-69							1	
16	Planta ORITO-69	1							
28	42								1
29	Planta ORITO-69				1				
41	Planta ORITO-69					1			
42	105								1
46	29				1				
47	16	1							
51	Planta ORITO-69						1		
61	88					1			
63	47	1							
69	4							1	
88	41					1			
90	9		1						
96	7			1					
97	46				1				
105	Planta ORITO-69								1
7	11			1					
9	Planta ORITO-69		1						
11	Planta ORITO-69			1					
20	31						1		
31	51						1		
31D	90		1						

Tabla 26 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 73. Variable X(i,j,k) en la instancia 1.

Inicio (i)	Destino (j)	Vehículo1	Vehículo2	Vehículo3	Vehículo4	Vehículo5	Vehículo6	Vehículo7	Vehículo8
Planta ORITO-73	15			1					
Planta ORITO-73	44	1							
Planta ORITO-73	64					1			
Planta ORITO-73	75						1		
Planta ORITO-73	77							1	
Planta ORITO-73	85								1
Planta ORITO-73	86		1						
Planta ORITO-73	89				1				
15	39			1					
17	Planta ORITO-73	1							
39	76			1					
44	22	1							
64	87					1			
67	Planta ORITO-73					1			
70	Planta ORITO-73		1						
71	70		1						
73	Planta ORITO-73				1				
74	Planta ORITO-73						1		
75	83						1		
76	Planta ORITO-73			1					
77	77A							1	
77A	Planta ORITO-73							1	
83	74						1		
84	92				1				
85	104								1
86	71		1						
87	67					1			
89	84				1				
92	73				1				
104	Planta ORITO-73								1
22	17	1							

Tabla 27 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 99. Variable X(i,j,k) en la instancia 1.

Inicio (i)	Destino (j)	Vehículo1	Vehículo2	Vehículo3	Vehículo4	Vehículo5	Vehículo6	Vehículo7	Vehículo8
Planta ORITO-99	27							1	
Planta ORITO-99	48						1		
Planta ORITO-99	58			1					
Planta ORITO-99	66					1			
Planta ORITO-99	72								1
Planta ORITO-99	94		1						
Planta ORITO-99	98				1				
Planta ORITO-99	99	1							
1	54					1			
18	Planta ORITO-99						1		
27	55							1	
30	45								1
45	Planta ORITO-99								1
48	106						1		
49	53	1							
53	Planta ORITO-99	1							
54	Planta ORITO-99					1			
55	103							1	
56	32			1					
58	56			1					
66	1					1			
72	30								1
94	Planta ORITO-99		1						
98	23				1				
99	25	1							
103	Planta ORITO-99							1	
106	18						1		
13	Planta ORITO-99				1				
23	13				1				
25	49	1							
32	Planta ORITO-99			1					

Tabla 28 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 12. Variable X(i,j,k) en la instancia 2.

Inicio (i)	Destino (j)	Vehiculo1	Vehiculo2	Vehiculo3	Vehiculo4	Vehiculo5
Planta ORITO-12	3			1		
Planta ORITO-12	50					1
Planta ORITO-12	93		1			
Planta ORITO-12	8	1				
Planta ORITO-12	19				1	
1H	Planta ORITO-12			1		
1 HST	1H			1		
3	1 HST			1		
26	Planta ORITO-12					1
27	57				1	
50	26					1
57	Planta ORITO-12				1	
80	Planta ORITO-12	1				
81	80	1				
82	12		1			
93	78		1			
78	82		1			
8	81	1				
12	Planta ORITO-12		1			
19	27				1	

Tabla 29 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 31. Variable X(i,j,k) en la instancia 2.

Inicio (i)	Destino (j)	Vehiculo1	Vehiculo2	Vehiculo3	Vehiculo4	Vehiculo5
Planta ORITO-31D	30			1		
Planta ORITO-31D	45				1	
Planta ORITO-31D	53		1			
Planta ORITO-31D	105	1				
Planta ORITO-31D	25					1
28	Planta ORITO-31D					1
30	49			1		
42	Planta ORITO-31D	1				
45	51				1	
49	90			1		
51	9				1	
53	97		1			
72	42	1				
90	Planta ORITO-31D			1		
97	31		1			
105	72	1				
9	Planta ORITO-31D				1	
25	28					1
31	31D		1			
31D	Planta ORITO-31D		1			

Tabla 30 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 35. Variable X(i,j,k) en la instancia 2.

Inicio (i)	Destino (j)	Vehiculo1	Vehiculo2	Vehiculo3	Vehiculo4
Planta ORITO-35	5	1			
Planta ORITO-35	37			1	
Planta ORITO-35	21				1
Planta ORITO-35	35		1		
5	43	1			
14	Planta ORITO-35			1	
37	65			1	
38	Planta ORITO-35				1
40	Planta ORITO-35	1			
43	40	1			
65	14			1	
10	Planta ORITO-35		1		
21	24				1
24	38				1
35	36		1		
36	10		1		

Tabla 31 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 47. Variable X(i,j,k) en la instancia 2.

Inicio (i)	Destino (j)	Vehiculo1	Vehiculo2	Vehiculo3	Vehiculo4	Vehiculo5
Planta ORITO-47	4			1		
Planta ORITO-47	41		1			
Planta ORITO-47	55				1	
Planta ORITO-47	60	1				
Planta ORITO-47	63					1
4	69			1		
16	Planta ORITO-47	1				
29	Planta ORITO-47				1	
41	88		1			
46	29				1	
47	Planta ORITO-47					1
55	46				1	
60	16	1				
61	47					1
63	96					1
69	20			1		
88	7		1			
96	61					1
7	Planta ORITO-47		1			
20	Planta ORITO-47			1		

Tabla 32 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 58. Variable X(i,j,k) en la instancia 2.

Inicio (i)	Destino (j)	Vehiculo1	Vehiculo2	Vehiculo3	Vehiculo4	Vehiculo5
Planta ORITO-58	18		1			
Planta ORITO-58	56					1
Planta ORITO-58	58	1				
Planta ORITO-58	23			1		
Planta ORITO-58	33				1	
ORITO SUR-1	66	1				
18	106		1			
48	Planta ORITO-58		1			
54	SUR-1	1				
56	32					1
58	54	1				
66	Planta ORITO-58	1				
94	99				1	
98	13			1		
99	Planta ORITO-58				1	
106	48		1			
13	Planta ORITO-58			1		
23	98			1		
32	Planta ORITO-58					1
33	94				1	

Tabla 33 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 71. Variable X(i,j,k) en la instancia 2.

Inicio (i)	Destino (j)	Vehiculo1	Vehiculo2	Vehiculo3	Vehiculo4
Planta ORITO-71	67				1
Planta ORITO-71	85	1			
Planta ORITO-71	87			1	
Planta ORITO-71	103		1		
59	Planta ORITO-71			1	
64	Planta ORITO-71		1		
67	92				1
68	59			1	
71	Planta ORITO-71				1
85	86	1			
86	Planta ORITO-71	1			
87	68			1	
92	104				1
103	11		1		
104	71				1
11	64		1		

Tabla 34 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 77. Variable X(i,j,k) en la instancia 2.

Inicio (i)	Destino (j)	Vehiculo1	Vehiculo2	Vehiculo3	Vehiculo4
Planta ORITO-77	39	1			
Planta ORITO-77	74				1
Planta ORITO-77	75		1		
Planta ORITO-77	77A			1	
6	15	1			
15	Planta ORITO-77	1			
39	6	1			
44	73			1	
73	Planta ORITO-77			1	
74	84				1
75	83		1		
76	Planta ORITO-77		1		
77	Planta ORITO-77				1
77A	44			1	
83	76		1		
84	89				1
89	77				1

Tabla 35 Rutas generadas por el modelo de ruteo VRP. PLANTA ORITO 91. Variable X(i,j,k) en la instancia 2.

Inicio (i)	Destino (j)	Vehiculo1	Vehiculo2	Vehiculo3	Vehiculo4
Planta ORITO-91	17		1		
Planta ORITO-91	52				1
Planta ORITO-91	95			1	
Planta ORITO-91	102	1			
1	Planta ORITO-91			1	
2	1			1	
17	22		1		
52	34				1
62	91		1		
70	101	1			
91	Planta ORITO-91		1		
95	2			1	
100	Planta ORITO-91				1
101	Planta ORITO-91	1			
102	70	1			
22	62		1		
34	100				1