



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Metodología AVL y ruteo de vehículos con base en eventos históricos de unidades de monitoreo

Ing. Faider Florez Valencia

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión

Medellín, Colombia

2016

Metodología AVL y ruteo de vehículos con base en eventos históricos de unidades de monitoreo

Ing. Faider Florez Valencia

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ingeniería de Sistemas

Director

Ph.D. Francisco Javier Moreno Arboleda

Línea de Investigación:

Bases de Datos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión

Medellín, Colombia

2016

Dedicatoria

A las personas que siempre me han acompañado:

*Mi familia, padre, madre, hermana que
contribuyeron constantemente en mi formación
personal y académica, y me han dado todo su
apoyo para seguir adelante.*

*A esa persona especial que me animaba a realizar
un esfuerzo más para continuar camino a la meta.*

*A quienes me apoyaron con sus conocimientos y
compartieron este propósito.*

*"...se dará tiempo al tiempo, que suele dar dulce
salida a muchas amargas dificultades"*

La Gitanilla - Miguel de Cervantes Saavedra.

Faider Florez Valencia

Agradecimientos

Presento mi agradecimiento a todas esas personas que estuvieron involucradas en este proyecto de investigación, que me apoyaron constantemente y me ayudaron a poder cumplir esta meta de poder aportar al conocimiento de la humanidad.

Mi más grande agradecimiento y admiración para el Ph.D Francisco Javier Moreno Arboleda por todo su conocimiento, apoyo y paciencia para poder sacar esta tesis adelante. Por transmitir su experiencia y encaminarme por el camino adecuado, constantemente. Gracias por hacerme ver las oportunidades de mejora y por ayudarme a pesar del tiempo, que a veces era corto.

A mis seres queridos: Mi madre (Ángela María Valencia), mi padre (Luis Alfonso Florez), mi hermana (Ángela María) que siempre estuvieron pendientes de mi progreso y me ayudaron en todo.

A esas personas que me dieron un aliento de estímulo en los momentos difíciles y me animaron a continuar con el proceso: A Natalya, Juan Ricardo, Carolina, Juan Felipe, Jhon Leon, por darme sus puntos de vista y brindarme el apoyo necesario, escuchándome y comprendiendo las dificultades. A Jehová Dios, ser espiritual supremo y que me guía en el camino diario.

A la empresa Satrack Inc de Colombia y mis líderes y compañeros, por permitirme hacer esta tesis y propiciar las circunstancias necesarias

Doy gracias al Sr. Alejandro Castaño, a la Sra. Adriana Carmona, al Sr. Julio Munera, y al Sr. Federico Salazar, miembros y gerentes de la empresa Satrack, por apoyarme en la realización de esta tesis y brindarme la oportunidad de usar los datos necesarios para completarla.

Resumen

Las empresas de transporte son una parte fundamental de la economía de todo país, encargadas del desplazamiento de objetos materiales y personas de un sitio de origen a otros de destino, y que necesitan poder realizar eficientemente su proceso de transporte, para lo cual se programan viajes que cumplen una programación realizada por los gestores de transporte de dichas empresas.

El problema de ruteo de vehículos ha sido analizado durante varios años por investigadores en la academia empezando en la década de 1950 por (Dantzing & Ramser, 1959) y empresas del sector de transporte con el fin de conocer sus variantes y se ha llegado a clasificar por las características físicas y de entorno del problema y para el cual algunos autores han propuesto soluciones mediante métodos exactos, heurísticas y metaheurísticas para este tipo de problemas que son analizados en esta tesis para poder tener un marco de referencia para proponer un modelo alternativo de solución que se base en hechos históricos de ejecución de la programación de viajes, i.e. que utilice datos históricos para analizar el comportamiento de vehículos en los viajes realizados.

El monitoreo de vehículos es un sistema de localización de vehículos en tiempo real y en el cual la transmisión de datos de posicionamiento y datos adicionales del estado de los vehículos, es analizados por empresas encargadas de dicho monitoreo. En este proceso se suele almacenar grandes volúmenes de datos que se pueden aprovechar para tener base histórica para la toma de decisiones sobre el ruteo y monitoreo de vehículos.

Los problemas que se han encontrado en los procesos de monitoreo son asociados a la logística de programación de viajes, que se analizará en este documento, y en los que se determinan las rutas por las cuales transitaran los vehículos, la obtención de información del posicionamiento y el estado de los vehículos, el seguimiento al cumplimiento de programaciones y el uso de los datos para obtener conocimiento a partir del análisis de los informes de los vehículos, entre otros.

En esta tesis se propone un modelo de procesamiento de datos que permite extraer el comportamiento histórico de una flota de vehículos para poder tener una fuente para analizar dicho comportamiento en la ejecución de los viajes; basándose en principios de inteligencia de negocios geoespacial y minería de datos.

Palabras clave: Monitoreo de vehículos, ruteo de vehículos, reportes de unidades de monitoreo, rutas, programaciones, AVL, VRP, RVRP, transporte, logística, posicionamiento, inteligencia de negocios, minería de datos.

Abstract

The transportation companies are a vital part of the economy of any country, responsible for the movement of material objects and people from origin place to other destination, and they need to effectively perform their transport process, for which trips are scheduled compliant programming.

The vehicle routing problem (VPR) has been investigated in order to meet its variants and has come to be classified by their physical and environmental characteristics and for which some authors have proposed solutions exact methods, heuristics and metaheuristics for such problems which they are analyzed in this thesis in order to have a framework to propose an alternative model solution based on historical facts execution scheduling travel.

The vehicle monitoring system is the real-time location and positioning data and additional data on the state of vehicles. This process usually stores large volume of data that can be leveraged to have historical basis for making decisions about routing and monitoring of vehicles.

The problems found in these processes are associated with the logistics of travel schedule to determine the routes by which to transit vehicles, obtaining positioning information and status of vehicles, monitoring compliance with schedules and use of data to gain knowledge from the analysis of reports of vehicles, among others.

This thesis presents a model of data processing to extract the historical performance of a fleet of vehicles to have a source to compare with the implementation of the proposed travel; based on principles of geospatial business intelligence and data mining.

Keywords: Vehicle tracking, Automatic vehicle location, vehicle routing, tracking devices, routes, schedules, VRP, RVRP, transportation, logistics, positioning, business intelligence, data mining.

Tabla de contenido

Resumen.....	V
Abstract.....	VII
Lista de figuras.....	X
Lista de tablas.....	XI
Lista de abreviaturas.....	XII
1 INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 Justificación.....	17
1.2 Estructura de la tesis.....	19
1.3 Objetivos.....	20
Objetivo general.....	20
Objetivos específicos.....	20
1.4 Hipótesis.....	20
2 MARCO CONCEPTUAL DE LA PROBLEMÁTICA.....	21
2.1 Definiciones.....	21
2.2 Métodos de solución.....	26
2.3 Taxonomía de los VRP.....	30
2.4 Tipos de VRP.....	32
2.5 Método Delphi.....	33
2.6 Sistemas de información geográfico (SIG).....	34
2.7 Sistema de soporte a la decisión (DSS).....	35
2.8 Geo – Business Intelligence.....	36
2.9 Algoritmos de Minería de datos.....	38
3 REVISIÓN DE LITERATURA.....	40
Problemas de ruteo de vehículos enriquecido.....	44
4. PROPUESTA DE SOLUCIÓN Y VALIDACIÓN.....	55
4.1 Motivación y estado actual de las principales compañías de vehículos.....	55
4.2 Proceso de asignación de rutas.....	56
4.3 Recolección de datos a través del tiempo.....	60
4.4 Modelo de análisis de datos y descubrimiento de comportamientos de los vehículos en las rutas.....	64
4.4.1 Caso de estudio – Modelo de ejecución.....	68
4.4.2 Análisis de comportamiento por minería de datos.....	74
a. Árboles de decisión.....	78
b. Clusters.....	80
c. Algoritmo de Bayes.....	82

d. Modelo predictivo	84
4.5 Validación del proceso con la propuesta de solución	86
a. Primera encuesta	86
b. Segunda encuesta	89
4.6 Comparación del modelo con soluciones actuales.	96
5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	104
5.1 Conclusiones.....	104
5.2 Trabajo Futuro.....	105
Referencias bibliográficas	107
Anexos	114
Anexo A. Encuesta cualitativa de ruteo de vehículos.	114
Anexo B. Encuesta cuantitativa de ruteo de vehículos.	117
Anexo C: Problemas tratables y no tratables.....	121
Anexo D. Top de las mejores empresas de monitoreo de vehículos del mundo (2016).	124

Lista de figuras

Figura 2-1: Esquema de los componentes de una unidad de monitoreo. (Satrack Inc de Colombia, 2015).....	23
Figura 2-2: Una clasificación de los métodos de solución (Adaptado de (Olivera, 2005))	29
Figura 2-3: Componentes de un DSS (French, 2010)	35
Figura 3-1: Monitoreo de vehículos en un RVRP (Elaboración propia).....	45
Figura 4-1: Geo-BI e Informes personalizados en las 20 mejores empresas de monitoreo de vehículos.	56
Figura 4-2: Abandonos por viaje.	58
Figura 4-3: Diagrama de la estructura de datos: EventosPosiciones y sus complementos (Elaboración propia).....	62
Figura 4-4: Configuración de una ruta (Elaboración propia)	64
Figura 4-5: Flujo de trabajo en un proceso de análisis de Geo-BI (Wickramasuriya, Ma, Berryman, & Perez, 2013).....	65
Figura 4-6: Proceso de extracción del conocimiento propuesto	67
Figura 4-7: Esquema relacional del modelo. (Elaboración propia)	69
Figura 4-8: Diferencias de tiempos para varias rutas por fecha. (Elaboración propia).....	72
Figura 4-9: Dimensiones y niveles jerárquicos de la dimensión Fecha (DimDate).....	73
Figura 4-10: Vista de viajes ejecutados.....	75
Figura 4-11: Árboles de decisión. (Elaboración propia).....	78
Figura 4-12: Red de dependencias del algoritmo de árboles de decisión.....	79
Figura 4-13: Escenarios de cumplimiento para un 30% de muestra de los datos.....	79
Figura 4-14: Clúster de no cumplimiento.....	80
Figura 4-15: Comparativa de los grupos con mayor y menor porcentaje de incumplimiento.....	81
Figura 4-16: Clusters de cumplimiento.....	81
Figura 4-17: Red de dependencias del algoritmo de Bayes.	83
Figura 4-18: Variables de influencia según el algoritmo de Bayes	83
Figura 4-19: Modelo predictivo	84
Figura 4-20: Importancia de la diferencia entre el tiempo planeado y el que de verdad empleó el vehículo	88
Figura 4-21: Importancia de tener mecanismos para conocer la ejecución histórica .	89
Figura 4-22: Métodos de creación de rutas.....	90
Figura 4-23: Opciones determinantes en la asignación de rutas.....	91
Figura 4-24: Variables más importantes de monitoreo.	92
Figura 4-25: Variables de influencia en la calificación de rutas.	94
Figura 4-26: Importancia de la diferencia entre planeado y ejecutado.....	95
Figura 4-27: Ruta 003-0030099	97
Figura 4-28: Rutas sugeridas por Google Maps.....	98
Figura 4-29: Suma de diferencias por mes de la ejecución frente a la programación	102
Figura 4-30: Probabilidades de cumplimiento.	103
Figura 4-31: Algoritmo de árboles de decisión para el caso particular de la ruta 003-0030099.....	103

Lista de tablas

Tabla 2-1: Taxonomía de problemas de ruteo de vehículos por evolución y calidad de los datos. (Adaptado de (Victor Pillac et al., 2011)).....	32
Tabla 3-1: Revisión de los métodos aplicados. Adaptado de (De Jaegere et al., 2014)	49
Tabla 3-2: Comparativa de estrategias de solución (Elaboración propia).....	51
Tabla 4-1: Comparativa entre datos operativos y datos de un DSS (Moreno, 2013) .	66
Tabla 4-2: Diferencias de tiempos para varias rutas.	70
Tabla 4-3: Variables de los tres algoritmos de minería de datos.	76
Tabla 4-4: Variables, tipos y contenido.	77
Tabla 4-5: Comparativa de porcentajes de cumplimiento y no cumplimiento	82
Tabla 4-6: Resultados de predicción para el algoritmo de árbol de decisiones.	85
Tabla 4-7: Comparativa del modelo con las propuestas del cliente y Google Maps ..	99
Tabla 4-8. Promedios de duración	101
Tabla 4-9: Suma de diferencias por mes.....	101

Lista de abreviaturas

ABREVIATURA	TERMINO
AVL	Automatic Vehicle Location – Localización automática de vehículos.
VRP	Vehicle Routing Problem – Problema de ruteo de vehículos.
RVRP	Rich Vehicle Routing Problem – Problema de ruteo de vehículos enriquecido.

1 INTRODUCCIÓN

El problema de ruteo de vehículos ha sido ampliamente tratado desde la década de 1950 (Dantzing & Ramser, 1959). Desde entonces el problema ha evolucionado y su estudio ha contribuido a la economía de transporte y a las empresas que tienen relación directa o indirecta con este sector.

Las empresas transportadoras de paquetes y de mercancías, necesitan entregar cientos o miles de encomiendas diariamente como parte de la cadena de abastecimiento, i.e. como un eslabón entre las empresas productoras y los clientes. Y las empresas de transporte de pasajeros necesitan tener rutas por las cuales transitar y cumplir de manera eficiente el proceso de llevar a los pasajeros de sus orígenes a sus destinos. En este proceso, es fundamental la reducción de costos asociados con el transporte, por ello la solución a los problemas de ruteo de vehículos o los asociados con el monitoreo permanente de la mercancía o de los pasajeros, son una prioridad, ya que si se hace una planificación eficiente de los clientes se reducen los gastos y los recursos usados (vehículos y personal). También se pretende aumentar las ganancias de transporte.(Centro de investigación de las telecomunicaciones (CINTEL), 2010).

Los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS por sus siglas en inglés) usan las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) para solucionar los problemas de ruteo de vehículos. Sus objetivos son reducir los costos, los tiempos de los recorridos y las distancias a recorrer, manejar la logística de carga/descarga de mercancía, gestionar la disponibilidad de la flota de vehículos y mejorar los tiempos de atención al cliente

El problema de ruteo de vehículos (VRP por sus siglas en inglés) es el problema central en investigación de operaciones aplicado a las ciencias de transporte (Lahyani, Khemakhem, & Semet, 2015). El problema se ha tratado de solucionar mediante formulaciones matemáticas exactas (e.g. modelos de programación lineal (enteros), algoritmos de acotamiento del conjunto de soluciones posibles) (Baldacci, Toth, & Vigo, 2007) (Baldacci & Mingozzi, 2009) (Baldacci, Mingozzi, & Roberti, 2012) o mediante métodos aproximados (e.g. métodos heurísticos, metaheurísticas e híbridos) (Olivera, 2004)

El VRP se ha enriquecido con restricciones que han originado los problemas de ruteo de vehículos enriquecido (RVRP). La idea de estos problemas es asociar más aspectos con el fin de crear modelos más cercanos a la realidad, e.g. las características cambiantes del entorno que afectan la operación de la flota, e.g. la distribución de clientes, el tipo de carga

que se transporta, las características inherentes a los vehículos, e.g. el tamaño de la flota, la capacidad de carga y el tipo de vehículos, entre otros. (Pellegrini, 2005), (Reyes et al., 2008) (Rieck & Zimmermann, 2010)

El monitoreo vehicular automatizado es una labor constante de las empresas que desean conocer las posiciones y el estado de su flota de vehículos “en todo momento” y saber el comportamiento de los vehículos, para lo cual se han desarrollado mecanismos que informan sobre la ubicación geográfica. y otros datos de interés de los vehículos y conductores, como el comportamiento en temas de velocidad, consumo de combustible, maneras de conducir, entre otros.

Sin embargo, este proceso no solo busca conocer la posición geográfica de un vehículo o una flota, sino que se necesita saber datos que se producen durante sus asignaciones (viajes), e.g. cumplimiento de la programación, progreso real frente al presupuestado, alternativas de rutas, entre otros, con el propósito de generar mecanismos que puedan contribuir a mejorar el proceso de ruteo.

Los principales problemas que hay en este campo son:

Dificultad para generar una logística de transporte

Si bien se han estudiado formas para poder programar un vehículo para que un conductor realizase un recorrido y que le permita ir a todos los destinos necesarios en su operación de trabajo; aún es un proceso complejo (en particular cuando el número de destinos es mayor a 10, las soluciones actuales no garantizan la solución óptima, problema del agente viajero) y con muchas carencias.

Monitoreo de vehículos para obtener la mayor cantidad de información del vehículo

En principio, los sistemas de monitoreo proveen la posición (latitud y longitud) prácticamente en cualquier momento.

Sin embargo, existen datos que han cobrado importancia y que se desean obtener además de la posición:

- Velocidad del vehículo.
- Hábitos de conducción (número de excesos de velocidad, aceleraciones, frenados y giros bruscos).
- Orientación (con respecto al norte)
- Altitud.
- Consumo de combustible.
- Riesgos de accidentes.
- Datos del conductor (e.g. identificación, nombre, teléfono).
- Alarmas en regiones (e.g, entradas y salidas de regiones, tiempo excedido dentro de región, exceso de velocidad en regiones, aperturas y cierres de puerta en sitios autorizados y no autorizados, entre otros.).
- Alarmas por infracciones de reglas de negocio (e.g. tiempos de detenciones, excesos de velocidad, tiempo de conducción, movimiento del vehículo en horario no permitido, manipulación de la unidad de monitoreo, pérdida de cobertura, entre otros).

En los últimos años, algunos de estos datos han sido incluidos en los informes que los vehículos realizan a través de sistemas de radio frecuencia o satelitales, se han procesado y almacenado por parte de empresas de monitoreo y seguimiento de vehículos, para enriquecer la logística de las empresas dueñas de dichos vehículos.

Estos datos se obtienen mediante el procesamiento de los eventos de monitoreo a nivel interno con la revisión de las configuraciones hechas por los usuarios del monitoreo. Sin embargo, no todas las unidades ni procesos de monitoreo incluyen todos los datos en cada informe de la unidad, ocasionando que se pierda información valiosa para el control de la flota.

Seguimiento en el cumplimiento de programaciones

A los vehículos se les hace un seguimiento a sus desplazamientos de tal manera que se pueda saber el estado de cumplimiento de sus programaciones. Pero en ocasiones surgen problemas para controlar la flota ya que las programaciones o asignaciones de rutas usualmente se hacen de manera empírica y no se utilizan datos históricos de las rutas; esto puede originar desfases entre lo planeado y lo ejecutado por los vehículos, he impide que se

haga un seguimiento adecuado a la labor efectuada por los conductores al comparar una programación basada en lo que piensa el gestor de flotas de las empresas y lo que en realidad sucede en carretera.

Uso de datos y búsqueda de conocimiento

Los vehículos monitoreados generan con el tiempo un gran volumen de datos, que pueden ser aprovechados para labores de logística, de cobros y de planificación, entre otras. Sin embargo, no siempre es así, en ocasiones se pasa por alto la información que se podría obtener a partir de estos informes o simplemente se almacenan, pero solo son consultados cuando surge una necesidad específica, por lo que el proceso es reactivo y no proactivo.

Con base en lo anterior, los aportes principales de esta tesis son:

- Analizar en la literatura los métodos de ruteo de vehículos actuales y verificar la manera como se están utilizando los datos históricos en la ejecución de rutas con el fin de dar una alternativa diferente a las propuestas por los modelos matemáticos exactos, los métodos heurísticos y las metaheurísticas, para la elección de las rutas.

- Plantear un modelo de monitoreo de vehículos *a priori* en el que se consideren los informes de unidades de AVL y la ejecución de programaciones anteriores para realizar un seguimiento con base en hechos históricos en el que se pueda comparar la ejecución de una programación actual con las que haya llevado a cabo con anterioridad un vehículo o una flota de vehículos con características similares.

- Descubrir comportamientos en los datos históricos que puedan servir a las empresas de monitoreo y las empresas dueñas de las flotas de vehículos en la toma de decisiones y en el análisis del comportamiento de los vehículos.

Para hacer esto se realizaron las siguientes actividades:

Vigilancia tecnológica de los problemas de ruteo de vehículos a través de la historia y las propuestas de solución.

Análisis del monitoreo de vehículos en algunas empresas del sector de transporte colombiano e internacional y en una empresa de monitoreo encargada de la recepción y procesamiento de los datos de cerca de 40000 vehículos en Colombia, Ecuador y Panamá.

Propuesta de un modelo que se vale de las técnicas de inteligencia de negocios y minería de datos para comparar la ejecución de los viajes de una flota de vehículos frente a lo programado.

Validación de los datos generados por el modelo y justificación basada en el concepto de expertos para la elaboración del modelo que permita realizar programaciones que se base en hechos históricos.

1.1 Justificación

El control logístico de operaciones de transporte es un ítem fundamental para las empresas de este sector de la economía y el manejo que se le dé a la flota resultará en ganancias o pérdidas para estas compañías.

En algún momento toda empresa de transporte tendrá que revisar como es la ejecución de las rutas si desea llevar a cabo un eficiente manejo de los vehículos.

Las programaciones usualmente consisten en desarrollar un plan de ejecución para despachar o enviar la flota de vehículos a unos destinos y se pretende que lleguen a tiempo, sin el menor contratiempo y con bajos costos operativos, sin embargo, estos ideales

dependen en gran medida de que la programación se haya realizado de la manera adecuada.

El problema está en que estas programaciones no siempre tienen bases bien fundamentadas para ser realizadas, salvo la necesidad de enviar un conductor en un vehículo a cumplir con dicha programación.

En algunas empresas, el manejo de la flota se vuelve un proceso diario que incluso puede automatizarse, sin embargo, los eventos de monitoreo de vehículos se utilizan para la creación de rutas, pero no se están aprovechando para analizar o crear indicadores de gestión que permitan comparar lo que se ejecuta frente a lo programado. No es usual que una empresa tenga procesos predictivos en la ejecución de una ruta con base en datos históricos. Normalmente se utilizan estos eventos en el caso que haya sucedido un evento, e.g. un accidente o un robo, y se necesita realizar una investigación de un suceso en particular que afectó la operación en un momento específico.

Con las potentes bondades que brindan las tecnologías de la información y con la capacidad de las bases y bodegas de datos actuales, es posible en este momento poder rescatar valiosa información de años hacia atrás de la forma como se comportaron las flotas de vehículos. Sin embargo, no solo es el hecho de tener la información disponible, sino el poder contar con un modelo de monitoreo basado en hechos históricos y que permita que el posicionamiento automático de un vehículo se conozca y se comparé la ejecución de la ruta actual con lo que ya ha realizado ese mismo vehículo o vehículos similares a través de los años en esas mismas programaciones.

Esta tesis aporta de manera significativa a los procesos de monitoreo de rutas y al seguimiento de posicionamiento de vehículos mediante un modelo que permite extraer conocimiento basado en eventos históricos.

Con la autorización de la empresa Satrack Inc de Colombia, con operación en Colombia, Ecuador y Panamá, se realizó esta investigación y se planteó un modelo que permitiera analizar los eventos históricos de los vehículos y su comportamiento cuando han sido asignados a rutas, dado que se cuenta con datos de vehículos monitoreados por esta empresa.

Las rutas de vehículos que se crean para los viajes permiten conocer sitios de origen y destinos de los vehículos, puntos de control y regiones de tránsito, así como establecer tiempos para la ejecución. Con estos datos y con las relaciones establecidas entre las rutas y

los conductores, clientes, jornadas de operación, tipos de vehículos, entre otros. Se tiene variables de entrada a un modelo para analizar el comportamiento de los vehículos asignados a las rutas y saber cómo se están llevando a cabo los cumplimientos. Es por esto que esta tesis contribuye a las empresas de transporte como también a las empresas de monitoreo para que se conviertan en generadores y procesadoras de datos, respectivamente, dentro de un proceso sistematizado que tenga como base las ejecuciones históricas y así poder realizar una adecuada gestión operativa.

1.2 Estructura de la tesis

En esta tesis se detalla un marco conceptual (capítulo 2) para entender los conceptos propios de la investigación y definición de las palabras más usadas en el contexto de monitoreo y ruteo de vehículos.

En la siguiente sección se presenta una revisión de la literatura para los problemas de ruteo de vehículos y las soluciones propuestas en forma de algoritmos exactos, heurísticas y metaheurísticas (capítulo 3).

Luego se presenta el modelo propuesto para la comparación de rutas programadas frente a las ejecutadas basadas en hechos históricos.

Se realiza una validación del modelo con el método de Delphi y se comparan los resultados del modelo con lo que ha sucedido durante los últimos años en la ejecución de rutas en una empresa de monitoreo de vehículos (capítulo 4).

Por último, se presentan las conclusiones y trabajo futuro de esta tesis (capítulo 5).

1.3 Objetivos

Objetivo general

- Plantear un modelo de localización automática y ruteo de vehículos basado en el análisis de los eventos históricos informados por unidades de monitoreo.

Objetivos específicos

- Establecer un mecanismo para el almacenamiento de eventos históricos de monitoreo de vehículos.
- Presentar la comparación de las rutas programadas y las rutas ejecutadas en un periodo de tiempo.
- Crear un mecanismo de obtención de conocimiento y sistema de soporte a la decisión basado en minería de datos de los informes de ejecución de las rutas.
- Validar el modelo con el consenso de los expertos en temas de logística de rutas y monitoreo de vehículos.

1.4 Hipótesis

Se puede establecer un modelo comparativo de programación y ejecución de rutas que esté acorde a lo que realmente sucede en los viajes que realizan los vehículos de una flota de transporte y así plantear alternativas al ruteo de vehículos que se realiza actualmente.

2 MARCO CONCEPTUAL DE LA PROBLEMÁTICA

2.1 Definiciones

2.1.1 Monitoreo de vehículos AVL

AVL (*Automatic Vehicle Location*) o rastreo vehicular automatizado es el conjunto de sistemas de localización remota en tiempo real basados usualmente en GPRS (ver 2.1.2), GSM (*Geographic Messaging Service*), Bluetooth, wifi y servicios satelitales.

Es un mecanismo de comunicación que permite interactuar con dispositivos que se encargan de enviar y procesar los datos de posicionamiento de los vehículos, su comportamiento, e.g. velocidad en cada reporte, consumo de combustible, lectura de las variables del computador a bordo, sentido con respecto al norte geográfico, información del conductor, entre otros. y las características de su entorno, e.g. altitud, entradas y salidas de regiones de tránsito, paso por puntos geográficos de interés, etc. Y además poder obtener datos de accesorios o instrumentos que complementen la lectura de información del vehículo, e.g. botones de pánico, cámaras, sensores de peso, sensores de llantas, sensores de giro de mixer (vehículos cementeros), audio en cabina, entre otros. (Song, 1994)

2.1.2 Monitoreo GPRS

Es el monitoreo de vehículos y la transmisión de los datos a través de redes celulares. GPRS (*General Packet Radio Service*) es un canal de comunicación celular que permite transmitir y recibir datos desde y hacia una unidad de monitoreo (ver 2.1.5), dicho canal depende de la cobertura de la compañía celular. En este tipo de comunicación se pueden recibir datos en menos de diez segundos. (Granbohm & Wiklund, 1999)

2.1.3 Monitoreo Satelital

Es el monitoreo que se hace a través de proveedores satelitales y donde el transmisor envía los datos mediante satélites, que procesan y retransmiten a una central de información que los distribuye vía internet. El envío y recepción en este medio puede tardar entre 3 y 5 minutos.

2.1.4 GPS

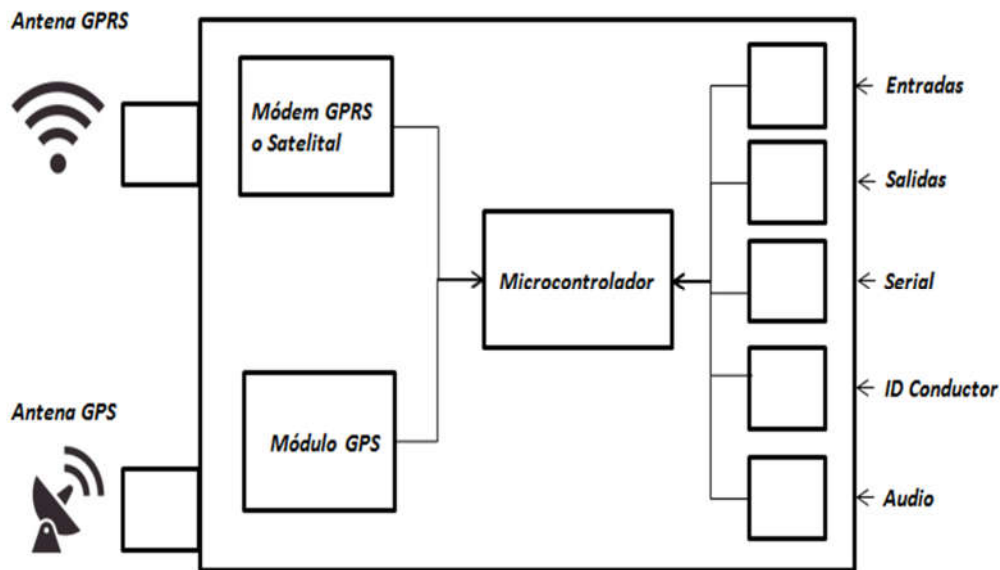
El GPS (*Global Positioning System*) es el sistema de navegación o de posicionamiento global más extendido y con el que se puede ubicar cualquier objeto en la tierra con unas coordenadas espaciales llamadas latitud y longitud. (McNeff, 2002)

2.1.5 Unidad de monitoreo

Es un componente de *hardware* que se encarga de transmitir datos de los vehículos a través de algunos de los medios de comunicación mencionados.

Los componentes de una unidad de monitoreo según se muestra en la figura 2-1 son una antena GPRS o una antena satelital, que se usa para transmitir y recibir datos hacia y desde la central de recepción de señal celular o satelital; las más comunes son las antenas GPRS que usan señal de radiofrecuencia a través del sistema celular para la comunicación. Dichas antenas se comunican con el microcontrolador o “cerebro” de la unidad mediante un módulo GPRS o un módulo satelital. En ocasiones las unidades pueden ser duales, es decir, están preparadas para comunicarse en condiciones normales mediante señal GPRS, pero cuando se encuentran sin cobertura, cambian su funcionamiento a la red satelital.

Figura 2-1: Esquema de los componentes de una unidad de monitoreo. (Satrack Inc de Colombia, 2015)



Otro componente de la unidad de monitoreo, la cual está instalada en un vehículo, es la antena GPS que se encarga de determinar su posicionamiento espacial mediante coordenadas de latitud y longitud. Para poder determinar la posición se hace un proceso de triangulación donde tres satélites o más permiten ubicar el vehículo en cualquier posición del planeta. Si no se logra establecer la comunicación con por lo menos tres satélites, la unidad calcula posiciones aproximadas o informa pérdida de cobertura. Esta antena también tiene comunicación con el microcontrolador a través de un módulo GPS.

Por otro lado, las unidades no solo informan el posicionamiento geográfico, también pueden interactuar con componentes externos del vehículo. Para esto cuentan con puertos de entrada y salida de información.

Por los puertos de entrada se puede enviar datos de dispositivos conectados a la unidad, e.g. dispositivo lector de tarjetas de conductor (para saber qué persona está conduciendo el vehículo), botones de pánico, cámaras, accesorios de voz en cabina, sensores de sueño, lectores de peso, sensores de temperatura, indicadores de giro en mezcladoras de cemento, entre otros.

Por los puertos de salida se pueden enviar datos de la unidad a algún dispositivo o control del vehículo, e.g. comandos de apagado, cerrojo de puertas, restricción del módulo de conductores, mensajes de la terminal de datos, entre otros.

Todas las entradas y salidas se comunican con el microcontrolador para el almacenamiento y envío de datos o para la recepción de comandos de programación para las órdenes de salida.

2.1.6 Eventos de unidades

Cada vez que una unidad de monitoreo procesa y transmite datos se reconoce como un evento de posicionamiento. Un evento suele ser generado cada determinado tiempo o distancia; sin embargo, en ocasiones es el resultado de circunstancias como alarmas (e.g. excesos de velocidad), eventos programados (e.g. entradas y salidas de regiones), eventos generados por el conductor o el centro de comandos (e.g. botones de pánico).

2.1.7 Rutas

Una ruta es un trayecto desde una región de origen hasta una de destino.

Una ruta puede incluir varias regiones geográficas por las cuales transitará el vehículo para llegar desde la región origen hasta la región destino. Pueden existir varias rutas para llegar desde un origen hacia un destino debido a la existencia de diferentes vías.

También hacen parte de una ruta los puntos de control, que son posiciones geográficas por las que pasa un vehículo durante su trayecto.

En la literatura se pueden encontrar sinónimos de ruta como recorrido, camino o trayecto. En esta tesis se usa el término ruta.

2.1.8 Ruteo de vehículos

Son todos los mecanismos de programación de vehículos para que ejecuten rutas durante un intervalo de tiempo de tal manera que se puedan atender unos clientes ubicados geográficamente de manera dispersa. En ocasiones existen varias rutas para ir de un origen (cliente) a un destino (cliente) y se debe elegir una por la cual transitar.

2.1.9 Viajes y programaciones de vehículos.

Un viaje es la ejecución de una ruta, i.e. cuando un vehículo se programa para que transite a través de una ruta.

Las programaciones suelen darse cuando se tiene la necesidad de enviar un vehículo a un destino o varios destinos para cumplir con una labor determinada y para lo cual se crea una serie de pasos que debe hacer el vehículo para cumplir con su programación. Cabe aclarar que un viaje puede ser la ejecución de varias rutas o que en un viaje se puede elegir rutas diferentes, si existieran, para poder cumplir con una programación. El seguimiento a las programaciones de viajes es uno de los puntos principales que se analizará en esta tesis.

2.1.10. Empresas de transporte

Durante esta tesis cualquier referencia a una empresa de transporte, es toda aquella compañía del sector terciario de la economía (servicios) que se encarga de desplazar objetos (materiales, animales o personas) de un lugar a otro mediante vehículos automotores. Pueden ser de ser de dos tipos:

Carga:

- Autotransporte de carga seca
- Autotransporte de carga refrigerada
- Paquetería y mensajería
- Transporte de materiales y residuos peligrosos
- Autotransporte de vehículos (Madrinas)
- Autotanques y transporte de líquidos
- Grúas
- Mudanzas
- Transporte de Valores
- Transporte de animales.

Pasajeros:

- Autobuses urbanos, intermunicipales y nacionales

- Taxis
- Transporte público o privado de personas
- Transporte escolar
- Transporte de turismo

2.1.10 Problema de ruteo de vehículos (Vehicle Routing Problem)

Un VRP consiste en determinar un conjunto de rutas de costo mínimo para una flota de vehículos (los costos pueden ser medidos con respecto a tiempo, distancia o cualquier otra variable de interés que se presente en el recorrido del vehículo).

El VRP es modelado usualmente así:

Sea un $G = (V, E, C)$

Donde

$V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ son los vértices del grafo.

El vértice v_0 se conoce como depósito (origen) y el resto de los vértices son clientes (destinos).

$E = \{(v_i, v_j) \mid (v_i, v_j) \in V^2, i \neq j\}$ son los arcos que unen los vértices y representan las rutas entre los clientes

$C = (c_{ij})_{(v_i, v_j) \in E}$ es una matriz de costos definido sobre E y que representa las distancias, tiempos de viaje y costos de viaje.

El VRP consiste en definir el conjunto de rutas para K vehículos idénticos, que parten del origen de tal manera que cada cliente sea visitado exactamente una vez y con el objetivo de minimizar los costos de las rutas. (Victor Pillac, Gendreau, Guéret, & Medaglia, 2011) :

2.2 Métodos de solución

Son algoritmos para resolver las distintas instancias del VRP (*Vehicle Routing Problem*). Actualmente hay una gran variedad según el enfoque de optimización usado (local o global) o según la clase de algoritmos a la que pertenecen (e.g. si están basados en programación

lineal o en métodos exactos, o si son heurísticas clásicas o metaheurísticas (Lüer, Benavente, Bustos, & Venegas, 2009).

Los métodos de solución se suelen clasificar como muestra la figura 2-2 en los siguientes tipos:

a. Métodos exactos.

“Son aquellos métodos que parten de una formulación como modelos de programación lineal (enteros) o similares, y llegan a una solución factible (entera) gracias a algoritmos de acotamiento del conjunto de soluciones factibles”. (Lüer et al., 2009)

La generación de columnas es un ejemplo de los métodos exactos y corresponde a una metodología que divide el problema en dos etapas: en la primera se generan un conjunto de rutas factibles y en la segunda se utiliza un modelo de optimización de un problema de programación lineal para escoger las soluciones que tienen un costo reducido negativo para mejorar la función objetivo. (Duarte Alleuy, 2009).

b. Estrategias heurísticas

Son algoritmos que permiten obtener soluciones de buena calidad (cercanas a la solución óptima) para un problema dado. Esto permite tener menores tiempos de ejecución, pero sin asegurar la solución óptima. Pueden ser:

- Constructivas: parten de una solución cualquiera y van construyendo soluciones factibles con cada nueva ejecución.
- De mejora: parten de una solución inicial en la que se tiene una ruta entre el origen y el destino, luego se empiezan a usar otras rutas o partes de rutas factibles y se reemplazan en la solución; y así generar otras soluciones.
- Técnicas de relajación: parten de métodos exactos y buscan establecer límites que relajen o acoten el problema para encontrar soluciones parciales que ayuden a acelerar el proceso de solución del problema. (Lüer et al., 2009)

c. Estrategias meta-heurísticas

Son estrategias de tipo heurístico generales para la resolución de una variedad de problemas para los que no existe un algoritmo apropiado de solución, ya sea por la complejidad del problema, o por falta de estudios en la solución de este. Algunas técnicas de este tipo son:

i. Colonia de hormigas.

Son estrategias basadas en la naturaleza que siguen el ejemplo de las hormigas, a la hora de buscar su alimento, pues dejan rastros de soluciones factibles a modo de feromonas; para que de manera colaborativa el proceso vaya generando soluciones con cada ejecución de los algoritmos, utilizando los caminos que previamente ya se han recorrido para poder aprender por donde se podría encontrar la solución. El camino se corresponde con una secuencia de pasos históricos que se almacenan cuando se construye una solución, de tal manera que se simulan los movimientos de las hormigas (construcción de soluciones) y se busca que las nuevas iteraciones propongan soluciones que sigan la mayor cantidad de rastros dejados en cada camino. (Olivera, 2005)

ii. Meta-heurísticas de dos fases

Son algoritmos de búsqueda que en una primera fase buscan la solución de un problema con unos datos iniciales (“semillas”) y en una segunda fase, se toma la solución inicial como fuente de datos para las próximas ejecuciones del algoritmo que pretenden obtener mejores aproximaciones a la solución final. (J. Pirabán, 2008)

iii. Estrategias evolutivas.

Son metodologías meta-heurísticas donde se busca una solución inicial básica que al cambiar con cada ejecución genere otras soluciones que posiblemente sean mejores con relación a los parámetros que se estén analizando, e.g. el tiempo total de la ruta y el consumo de combustible.(A. J. Pirabán, 2008)

iv. Enjambre de partículas evolutivo (EPSO).

Son metodologías que emulan el comportamiento de las abejas y parten de conjuntos de solución (“partículas”) que se mueven en el espacio de búsqueda y que se ven influenciadas por su posición con respecto a las otras partículas, buscando que todas las “partículas” se muevan y converjan rápidamente en una solución global. (Galván, Arias, & Lamos, 2013)

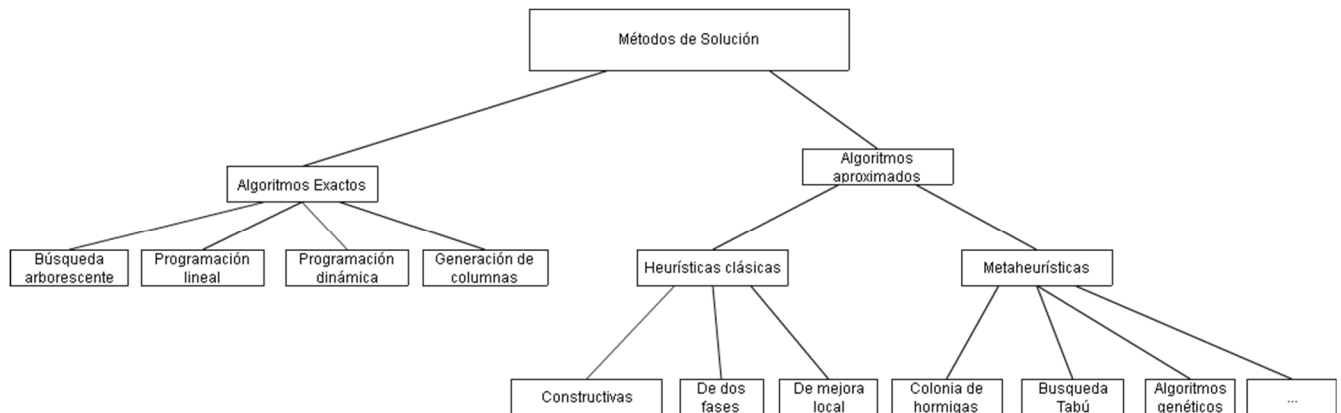
v. Búsqueda Tabú.

Es una técnica que consiste en una búsqueda local que acepta soluciones que deterioran el valor de la función objetivo pero que permiten salir de los óptimos locales evitando ciclos. (Olivera, 2005) Esta búsqueda se basa en almacenar en memorias adaptativas cortas las ultimas soluciones que se les consideran tabú pues no se deben utilizar durante un tiempo para así extender la búsqueda a otras soluciones. (Glover, 1986)

d. Híbridos

En estos métodos se combinan aspectos de varias heurísticas, meta-heurísticas o algoritmos exactos para obtener lo mejor de ellos.

Figura 2-2: Una clasificación de los métodos de solución (Adaptado de (Olivera, 2005))



2.3 Taxonomía de los VRP

Los problemas de ruteo de vehículos reales pueden clasificarse de dos maneras: según la evolución y la calidad de los datos que entran y salen del sistema. (Psaraftis, 1988).

La evolución de los datos se relaciona con el hecho de que en algunos problemas, en el momento de ejecutar las rutas, se presentan cambios con respecto a lo planeado, e.g. la llegada de una nueva petición para visitar un cliente.

La calidad de los datos se refiere a que cuando se planea y ejecuta una ruta existe cierta incertidumbre, e.g. cuando la demanda de los clientes en realidad es una estimación de la demanda real, pues no se sabe cuánto será la demanda en su totalidad, sino que se estima de acuerdo a funciones de probabilidad. (V. Pillac, Guéret, Medaglia, & Others, 2011).

De esta manera la definición canónica de un VRP (ver 2.1.10) no concuerda en su totalidad con los problemas del mundo real.

2.3.1 Entradas.

Todo sistema donde se analice un VRP cuenta con entradas que corresponden a las variables que se analizan como insumo para que se lleven a cabo los viajes de los vehículos, e.g. capacidad de cada vehículo, número de destinos programados para visitar.

2.3.2 Salidas.

Las salidas de un sistema con VRP son todos aquellos resultados que surgen de la operación de los vehículos en su asignación de rutas, como el total de tiempo invertido, el número de clientes que se lograron visitar, el total de tiempo invertido en cada cliente.

2.3.3 Clasificación. (ver tabla 2-1)

a. Problemas estáticos.

Son problemas donde todas las entradas a los algoritmos de decisión son conocidas y permanecen constantes en el tiempo. Por ejemplo, cuando en una programación de un

vehículo se conoce con anticipación la ruta y no hay cambios durante la ejecución, e.g. carga fija a transportar, número de clientes fijos a visitar.

b. Problemas dinámicos.

Son problemas de VRP donde las entradas de los algoritmos son cambiantes y pueden generar diferentes salidas según la aparición de las variables en diferentes momentos. e.g. se tiene una programación de clientes variable, i.e. no se cuenta con un número exacto de clientes programados, sino que, en plena ejecución del viaje, pueden resultar nuevos clientes a visitar.

c. Problemas determinísticos

Son problemas donde las entradas ya tienen unas salidas determinadas y no dan lugar a la incertidumbre. Por ejemplo, cuando se sabe que se entregará un número de productos en los destinos programados.

d. Problemas estocásticos.

Son problemas donde las salidas del problema se dan de acuerdo a funciones de probabilidad en la forma como se comportarán los vehículos dentro de la ejecución de la programación de los viajes, e.g. cuando hay tiempos de atención en los destinos que varían según el punto a donde se llega; hay ocasiones que una entrega puede ser inmediata o donde se tenga que hacer una fila de entrega, esto genera que el viaje se retrase.

Tabla 2-1: Taxonomía de problemas de ruteo de vehículos por evolución y calidad de los datos. (Adaptado de (Victor Pillac et al., 2011))

		Calidad de los datos	
		Entradas determinísticas	Entradas Estocásticas
Evolución de los datos	Entradas conocidas de antemano	Estático-determinísticos	Estático-estocásticos
	Entradas que cambian con el tiempo	Dinámico-determinísticos	Dinámico-estocásticos

2.4 Tipos de VRP

Robles, J. y Pincay, J. citando a Restrepo, J., et al (2008), Soto, D., et al (2008) y Jaqué. (2008) mencionan algunas variantes del VPR:

- MDVRP (*Multiple Depots VRP*), los vehículos parten desde diferentes depósitos.
- VRPSD (*VRP Stochastic Demands*), se conocen las demandas de las clientes expresadas mediante una distribución de probabilidad.
- VRPSC (*VRP Stochastic Customers*), el número de clientes es una variable estocástica conocida.
- VRPST (*VRP Stochastic Time*), los tiempos de viaje y de servicio son variables estocásticas conocidas.
- SDVRP (*Split Delivery VRP*), un mismo cliente puede ser atendido por varios vehículos, lo cual se aplica, e.g. cuando la demanda del cliente sobrepasa la capacidad del vehículo.
- VRPB (*VRP Backhauls*), el conjunto de clientes se divide en dos grupos, e.g. uno para hacer entregas y otro para hacer recolecciones.
- VRPPD (*VRP Picking & Delivery*), se hace recolección y entrega a cada cliente visitado.

- PVRP (*Period VRP*), el horizonte de planeación es para varios días, cada cliente se visita una sola vez.
- MFVRP (*Mix Fleet VRP*) o FSMVRP (*Fleet Size & Mix VRP*), el depósito cuenta con una flota de vehículos heterogénea, i.e. con capacidades de carga diferentes entre los vehículos.
- CVRPTW – VRPTW (*VRP with Time Windows*), una flota de vehículos con capacidad homogénea hace un servicio asociado con cada cliente. Los vehículos tienen intervalos de tiempo de permanencia en el sitio de destino, donde se permite el servicio (conocidos como ventanas de tiempo).
- VRPMT (*VRP with Multiple Trips*), un vehículo hace varios viajes desde el depósito a los clientes.

2.5 Método Delphi

El método *Delphi* es un mecanismo iterativo cuyo principal objetivo es obtener el consenso más confiable de opiniones de expertos mediante la aplicación sistemática de un cuestionario, de tal manera que se pueda tener una retroalimentación controlada de opiniones sobre un tema en específico. (Dalkey & Helmer, 1963)

Este método consiste en un proceso de 10 pasos nombrados a continuación.

1. Definición del problema.
2. Formación de un grupo que aborde un tema específico.
3. Diseño del cuestionario que se utilizará en la primera ronda de preguntas.
4. Prueba del primer cuestionario.
5. Entrega del cuestionario a los panelistas.
6. Análisis de las respuestas de la primera ronda de preguntas.
7. Preparación de la segunda ronda de preguntas y aprovechamiento de la primera ronda para perfeccionar las preguntas, siempre que proceda.
8. Entrega del segundo cuestionario a los panelistas.
9. Análisis de las respuestas de la segunda ronda de preguntas (los pasos 5 a 9 se deben repetir iterativamente hasta cuando se llegue a un consenso o se alcance una cierta estabilidad en las respuestas).

10. Preparación de un informe del equipo que permite analizar los resultados para presentar las conclusiones del ejercicio.

Sin embargo, se deben tener algunas consideraciones que mencionan (Skulmoski & Hartman, 2007) en las que se recomienda tener presente: la elección de la metodología, el cuestionario inicial si va a contener preguntas abiertas o ir directo a preguntas que pretendan enfocar a los expertos, el criterio de experticia, la número de participantes, el número y el modo de las interacciones, el rigor metodológico, los resultados, las verificaciones adicionales y la publicación del instrumento Delphi.

En ese estudio se concluyó que el método de Delphi es una técnica de investigación flexible, adecuada cuando no se tiene una visión completa del objeto de estudio y se desea requerir al concepto unificado de expertos.

Por esta razón durante la validación de la propuesta de solución de esta tesis se utilizan dos rondas de encuestas que siguen el método de Delphi para poder esclarecer la opinión de expertos sobre la forma como se programan rutas y se hace seguimiento a la ejecución de las rutas para validar la importancia de tener un modelo que permita hacer comparaciones de las rutas programadas y las ejecutadas en cuanto a tiempo.

2.6 Sistemas de información geográfico (SIG)

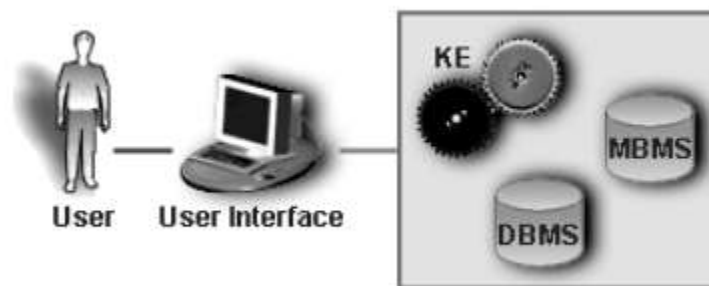
Los SIG son herramientas de análisis de datos que integran de manera organizada, software, hardware, procedimientos y datos geográficos y cuyas principales funciones son capturar, administrar, analizar, modelar y graficar datos y objetos de naturaleza geográfica que son especialmente referenciados en este tipo de sistemas. (Tomalá Robles & Villa Pincay, 2010)

2.7 Sistema de soporte a la decisión (DSS)

Un DSS es un sistema de información que soporta el proceso de toma de decisiones en organizaciones y negocios; tiene una base computacional y ayuda al personal que lo usa para resolver problemas con base en lo que se analiza mediante el sistema. (Keen, 1980)

En el contexto de los problemas de ruteo de vehículos, el proceso de toma de decisiones usualmente recae sobre el gestor de la flota. Y un DSS es una valiosa herramienta que puede ayudarle a dicho gestor a decidir sobre problemas complejos que se presentan en las programaciones y ejecuciones de las rutas.

Figura 2-3: Componentes de un DSS (French, 2010)



(French, 2010) citando a (Marakas, George, 1998) establece que un DSS tiene cinco componentes principales en su arquitectura (ver figura 2-3):

- Sistema de administración de datos (Data managment system – DBMS): Sistema de almacenamiento especializado para el apoyo a la toma de decisiones.
- Modelo de administración del sistema (Model managment system – MBMS)
Extractor y depurador de datos desde las BDs operativas.
- Motor de conocimiento (Knowlage engine – KE)
Núcleo del sistema que determina las propuestas de solución.
- Interfaz de usuario (User interface)

Informes y gráficos a modo de presentación que sean fácilmente entendibles por el usuario.

- Usuario (User)

Los DSS son útiles para resolver problemas dinámicos es decir que son muy cambiantes en el tiempo y que no son fácilmente especificables mediante estructuras fijas; permiten la obtención de conocimiento y las tendencias del ambiente que se analiza.

Permiten realizar una predicción del comportamiento de las entidades que participan en el DSS y la detección de riesgos. (Moreno, 2013)

2.7.1 Bodegas de datos (Datawarehouse - DW)

Las DW son almacenes de grandes volúmenes de datos que hacen parte de los DSS y permiten dar respuesta instantánea a consultas para la toma de decisiones e identificar oportunidades y estrategias efectivas del negocio, sin los problemas que se presentan en las bases de datos transaccionales cuando se maneja un alto número de registros en bases de datos. El horizonte de almacenamiento de una DW es de años incluso décadas.

El conjunto de procedimientos computacionales para seleccionar, extraer y visualizar los datos de las bodegas de datos es conocido como OLAP (Online analytical processing).

2.8 Geo – Business Intelligence

La inteligencia de negocios (Business Intelligence – BI) es un término que incluye las aplicaciones, las herramientas, la infraestructura y las mejores practicas para habilitar el acceso a la información y a su análisis para mejorar y optimizar las decisiones y acciones. (Gartner, 2016)

Esta disciplina es utilizada en las empresas como una herramienta estratégica para mejorar la rentabilidad en sus operaciones y aumentar el beneficio.

La técnica de BI puede ser combinada con muchas ramas del conocimiento entre ellas la información geoespacial, conocida entonces como Geo – BI y es un potente sistema de soporte a la decisión para la planificación y revisión de la ejecución de las rutas.

Cuando se utiliza Geo – Bi y se complementa con los sistemas de información geográfica (SIG) se pueden tener sistemas de soporte a la decisión y así proporcionar herramientas para gestionar y controlar los componentes geográficos. (Wickramasuriya, Perez, & Berryman, 2013)

En el tema de creación, asignación y seguimiento de rutas de vehículos, se tiene un componente geográfico que puede ser analizado con las técnicas de Geo-BI y en esta investigación han sido usadas para determinar la ejecución de las rutas y poder compararlas con las programadas y las sugeridas en los sistemas geográficos.

ETL (Extracción, Transformación y Carga)

Las ETLs son el proceso estándar adoptado en la migración de datos en un entorno de bases de datos con gran volumen y en las bodegas de datos de almacenamiento optimizado.

Una ETL usualmente contiene herramientas de extracción de datos de fuentes heterogéneas (e.g. bases de datos, hojas de cálculo, archivos planos, sistemas de información, entre otros)

En el segundo proceso de las ETLs se tienen herramientas de transformación de los datos, que se configuran de acuerdo a la necesidad del proceso, (e.g ordenamiento, división, combinación, entre otros):

Por último, el propósito de la creación de una ETLs es poder migrar los datos a un destino luego de haberlos procesado, en este caso se utilizan las herramientas de carga de datos para almacenar el resultado de las transformaciones en bases de datos, bodegas de datos, áreas de intercambio, hojas de cálculo, archivos planos, entre otros destinos heterogéneos.

2.9 Algoritmos de Minería de datos.

Los algoritmos de minería de datos son conjuntos de cálculos y reglas heurísticas que permiten crear un modelo a partir de los datos. El procesamiento de estos algoritmos comienza con análisis de los datos en busca de patrones de comportamiento o tendencias embebidas en los datos.

Algunos de los tipos de algoritmos de minería de datos son: (Microsoft, n.d.)

- **Algoritmos de clasificación**, que predicen una o más variables discretas, basándose en otros atributos del conjunto de datos.
- **Algoritmos de regresión**, que predicen una o más variables continuas, como las pérdidas o los beneficios, basándose en otros atributos del conjunto de datos.
- **Algoritmos de segmentación**, que dividen los datos en grupos, o clústeres, de elementos que tienen propiedades similares.
- **Algoritmos de asociación**, que buscan correlaciones entre diferentes atributos de un conjunto de datos. La aplicación más común de esta clase de algoritmo es la creación de reglas de asociación, que pueden usarse en un análisis de la cesta de compra.
- **Algoritmos de análisis de secuencias**, que resumen secuencias o episodios frecuentes en los datos, como un flujo de rutas web.

La elección de los algoritmos depende de la experiencia y el propósito del analista y se acostumbra analizar más de un algoritmo para ver el comportamiento de los datos.

En esta tesis se crea un modelo de soporte a la decisión basado en tres algoritmos de minería de datos:

a. Algoritmo de árboles de decisión:(Microsoft, 2016a)

Son algoritmos de clasificación y regresión que se eligieron pues son ideales para predecir el comportamiento de variables discretas o continuas y buscar grupos de elementos comunes en las transacciones. Y como la variable de interés principal para este estudio es el cumplimiento de las rutas en términos de tiempo, es adecuado el modelamiento de manera discreta.

Este algoritmo identifica las columnas de entrada de un conjunto de datos y realiza predicciones basadas en las relaciones entre dichas columnas y las variables de predicción.

b. Algoritmo de Clusters (Microsoft, 2016c)

Son algoritmos de segmentación que se eligieron porque son buenos para predecir variables discretas, predecir secuencias de acciones y buscar grupos de elementos similares. También se cumple al igual que en los algoritmos de árboles que permiten analizar el comportamiento del cumplimiento de las rutas.

Estos algoritmos utilizan técnicas iterativas para agrupar los casos de un conjunto de datos que tengan características similares, lo cual los hace útiles para buscar anomalías o similitudes en los datos, crear predicciones y explorar los datos.

En el caso de análisis de las rutas permite ver relaciones entre los datos que no se podrían observar en una revisión manual de los datos o mediante consultas básicas a bases de datos.

c. Algoritmo de Bayes naive (Microsoft, 2016b)

Son algoritmos de clasificación basados en los teoremas de Bayes (estructuras que permiten el cálculo de probabilidades basadas en la ocurrencia de un evento) y que sirven para crear modelos de predicción de variables discretas; de nuevo esta es una buena razón para ser incluido en el modelo propuesto por esta tesis.

La implementación del algoritmo por parte de Microsoft calcula la probabilidad de cada estado de columna de entrada dado cada posible estado de la variable de predicción.

Como inconveniente de este algoritmo, se debe mencionar que no tiene en cuenta variables de entrada continuas.

3 REVISIÓN DE LITERATURA

El problema del VRP comenzó a ser analizado en la década de 1950. Uno de los primeros acercamientos lo hizo Dijkstra con un algoritmo para encontrar el camino más corto desde un vértice de origen al resto de los vértices en un grafo con pesos en las aristas (Dijkstra, 1959).

Una de las principales variantes del VRP, es el problema del agente viajero (TSP, *Travel Salesman Problem*) (Lüer et al., 2009); donde existe solo un vehículo disponible para visitar una y sola una vez un conjunto de clientes partiendo de un punto inicial y retornando finalmente a este mismo punto, y de tal forma que la ruta sea la más corta (Tomalá Robles & Villa Pincay, 2010). (Applegate, Bixby, Chvátal, & Cook, 2007) explican porque este problema es relevante en computación y exponen diferentes estrategias para su solución. Los algoritmos genéticos también se han usado para solucionar el TSP (García, 2012). (Krumke, 2001) analizó este problema, pero con una variable interesante para este trabajo de investigación, ya que incluye el procesamiento en tiempo real en un caso llamado TSP Online (OLTSP).

Las soluciones exactas fueron las primeras que se plantearon para este tipo de problemas; sin embargo, rápidamente se buscaron otras soluciones debido a que el tiempo de procesamiento computacional crece exponencialmente a medida que se introducen nuevos clientes (este tipo de problemas se conoce como NP-Complejos), actualmente se pueden procesar mediante estos métodos aproximadamente hasta un total de 50-70 clientes. (Olivera, 2004). La teoría de grafos permite resolver los problemas de VRP y ha sido aplicada en casos en los que el número de clientes no superan estos límites. Un ejemplo de la aplicación de esta teoría se ve en empresas pequeñas de distribución de paquetes donde el número de clientes visitados en un día por un solo vehículo no suele ser superior a 50; además cuentan con sistemas de distribución de entrega y de recogida de paquetes, donde un vehículo sale de un punto de origen y no regresa hasta terminar su programación. (Cortés Puchades, Mula Bru, & Rodríguez Villalobos, 2008)

Sin embargo, los algoritmos exactos también pueden ser resueltos en un sistema de cómputo distribuido donde la carga de cómputo se distribuye entre varios computadores para disminuir el tiempo de ejecución. (Ver Anexo C).

La solución de problemas de optimización combinatoria como el TSP por medio de estrategias que buscan mejorar en el costo-beneficio en términos de la calidad y el uso de los recursos computacionales se han analizado desde el punto de vista de las soluciones heurísticas y meta heurísticas.

Los métodos heurísticos en ocasiones sacrifican la precisión de la solución con el fin de conseguir tiempos de respuesta inferiores a los obtenidos con los métodos exactos. (Olivera, 2004) y (Kao & Wang, 2013) plantean algunos de los principales métodos heurísticos usados en la solución del VPR.

Los VRPs a través del tiempo se han enriquecido con elementos, de manera que se analicen diversas circunstancias que cambian el entorno del problema. Algunos de los casos que se han analizado son:

Ventanas de tiempo y flota homogénea (VRPTW):

El VRPTW es el problema más básico de ventanas de tiempo que son espacios contabilizados de tiempo que se convierten en costos para la operación, e.g. cuando un vehículo permanece parqueado en un lugar. Este tipo de problemas se plantea para una ruta homogénea de vehículos y busca saber cuál es la capacidad total de los vehículos y repartir la operación de manera homogénea entre los mismos (Duarte Alleuy, 2009).

Los VRPs con ventanas de tiempo en un sistema de cómputo distribuido fue planteado por (Martínez Quijano, 2010). (Tomalá Robles & Villa Pincay, 2010) solucionaron el VRPTW mediante algoritmos genéticos. (Qi, Ding, Zhou, & Miao, 2011) plantea este problema analizando las distancias en términos espaciales o de localización y temporales en términos de ventanas de tiempo y lo soluciona con meta heurísticas de búsqueda local de dos fases. Otra propuesta de solución es la generación de columnas que son heurísticas analizadas en (Duarte Alleuy, 2009) y (Rojas Mejías, 2012)

Ventanas de tiempo y entregas y recolección de mercancía: Pickup and Delivery Problem with Time Windows, (PDP-TW):

(López Pérez & Badii, 2004, 2005) compararon los algoritmos genéticos y los métodos de ramificación y corte (que son métodos exactos) y concluyeron que las meta-heurísticas son estrategias que generan soluciones que aunque no son exactas pueden ahorrar tiempo en la consecución de una solución, para el problema de PDP-TW, en el que un vehículo debe ir de un origen a varios destinos en cada uno de los cuales se tiene un requerimiento de volumen

de producto a entregar o a recoger, teniendo en cuenta las ventanas de tiempo necesarias para hacer el proceso de recolección o entrega, además de los costos de tiempo y distancia para la ruta.

Ventanas de tiempo para problemas multiobjetivos:

En (Hermosilla & Barán, 2004) se compara un algoritmo de colonia de hormigas con una estrategia evolutiva, como soluciones para la del VRP con ventanas de tiempo y como conclusión se muestra que los algoritmos evolutivos destacan por su flexibilidad para analizar circunstancias cambiantes como las de estos problemas. Además, demostraron que los algoritmos de colonia de hormigas aproximan mejor la solución cuando son acompañados de heurísticas de optimización local de cada ruta.

(López Castro, 2011) usó algoritmos genéticos híbridos para la solución multiobjetivo de este problema. Por ejemplo, una solución multiobjetivo es la que trata de minimizar costos de operaciones pero que al mismo tiempo se mantenga un nivel de atención al cliente con una calificación alta (considerando el término alto como un calificativo difuso). La contribución de este trabajo fue que las ventanas de tiempo podían ser cumplidas de manera parcial y el nivel de servicio era medido de forma difusa.

Ventanas de tiempo con capacidad:

Los métodos exactos para la solución de este problema fueron tratados en (Baldacci et al., 2012). El algoritmo de colonia de hormigas con búsqueda local también se ha usado para solucionar el VRP con capacidad de carga y considerando ventanas de tiempo (Zabala & Torres, 2005). Este problema también fue tratado por (Daza, Montoya, & Narducci, 2009) pero la estrategia de solución fue un algoritmo meta heurístico de dos fases.

Ventanas de tiempo y entregas parciales (VRPTWSD):

(Perosio & Zunino, 2008) plantearon un algoritmo de búsqueda tabú (que son meta-heurísticas de búsqueda local que usan memorias adaptativas, i.e. registro de soluciones anteriores) para solucionar el problema de VPR para la distribución de mercancía y en los que se consideren los espacios de tiempo para el abastecimiento en el depósito y para la atención de clientes, considerando que un cliente puede recibir entregas parciales de varios vehículos.

Restricciones de capacidad:

En estos problemas en los que no se incluyen ventanas de tiempo sino solamente la capacidad de los vehículos en una flota homogénea o heterogénea, (e.g, cuando las características físicas de los vehículos difieren unos de otros), se pueden usar métodos exactos. La solución mediante teoría de grafos fue desarrollada por (Correa Espinal, Cogollo Flórez, & Salazar López, 2011)

Demanda variable, trasbordos de pasajeros y ventanas de tiempo:

(Contardo Vera, 2005) incluyó el transbordo para pasajeros, i.e. cuando se necesitan intercambiar pasajeros entre los vehículos de la flota porque van hacia otros destinos o por el comportamiento de subida y bajada de pasajeros inherente, e.g. a una ruta de buses, y analizó como se convierte el problema en un caso dinámico debido a que la variable de entrada que es la demanda por la cantidad de pasajeros es cambiante con respecto al tiempo, diferente a los problemas donde previamente se conoce la cantidad de pasajeros a transportar y que no son variables en toda la ruta. Para la solución de este problema se utilizaron algoritmos exactos y heurísticos, concluyendo que los algoritmos heurísticos generan resultados más rápidos que los exactos, e.g para una flota de 3 vehículos se pueden obtener rutas para 21 clientes y 1 transbordo en menos de 3 horas, mientras que los exactos crecen de manera exponencial con más de 7 clientes e invierten tiempos de más de 3 horas.

La optimización de rutas de transporte urbano también entra en esta categoría y donde se busca programar los vehículos de tal forma que hagan recorridos óptimos (en tiempo) y que satisfagan la demanda de pasajeros y minimicen los gastos de operación. (Quintero, 2005) usó algoritmos genéticos para solucionar este problema.

Vehículos con múltiples viajes (VRPMT):

Este tipo de problemas se presenta cuando los vehículos deben hacer varios viajes en una misma programación de tal manera que deben visitar varios clientes volviendo múltiples veces al depósito inicial. (Olivera, 2005) solucionó estos problemas con algoritmos de búsqueda tabú.

Demandas Estocásticas (VRPSD):

Las demandas de un vehículo cuando son estocásticas, (i.e. que se comportan como una distribución de probabilidad y no de manera determinística) fueron estudiadas por (Galván et al., 2013) y se propuso como estrategia de solución una meta heurística híbrida de optimización de enjambre de partículas evolutivo (EPSO).

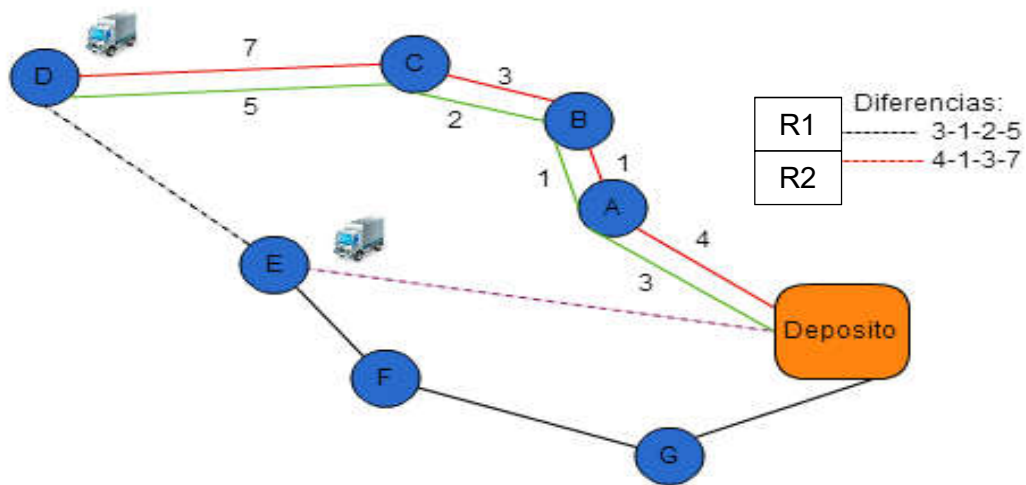
Múltiples depósitos:

Los problemas con múltiples destinos, múltiples orígenes y flota homogénea se han resuelto mediante heurísticas híbridas y meta heurísticas. (Isaza, 2012)

Problemas de ruteo de vehículos enriquecido.

Los VRPs enriquecidos (Hartl, Hasle, & Janssens, 2006) son los problemas descritos pero con elementos que los acerca cada vez más a los problemas de la vida real. En esta categoría están los casos más complejos de los VRP en términos de cantidad de variables, posibles soluciones y casos de aplicación que se tenga. Para solucionar los VRP no se puede desligar el recorrido de los vehículos de la programación que se desea llevar a cabo. Por ello se debe considerar además de la parte logística, las condiciones del entorno que rodean las rutas por las que van a transitar los vehículos, esto lo hacen los métodos de solución basados en el ambiente. Uno de los aspectos que considera estos métodos es la forma y el sentido de las vías de transporte. Este es el objeto de estudio de la geometría *taxicab*. (Reinhardt, 2005)

Figura 3-1: Monitoreo de vehículos en un RVRP (Elaboración propia)



Para ilustrar un RVRP, en la figura 3-1 se muestra un vehículo que debe hacer el recorrido Deposito - A - B - C - D - E - F - G - Deposito. Siendo los nodos [A: G] clientes que deben visitar los vehículos.

Una decisión de un gestor de flota corresponde a la programación del viaje ya sea por la ruta R1 de $3 + 1 + 2 + 5 = 11$ unidades de costo o enviarlo por la ruta R2 de $4 + 1 + 3 + 7 = 15$ unidades de costo.

Ahora suponga que cuando un vehículo llega a C ya se encuentra unas unidades de tiempo atrasado con respecto al tiempo esperado.

El cliente E es muy importante para la compañía y su atención a tiempo es prioritaria. ¿Qué decisión debe tomar el gestor? Usar otro vehículo para cubrir la ruta Deposito – E – F - G – Deposito es una opción; otra opción es indicarle al vehículo que no visite a D y que se dirija inmediatamente a E.

Otras investigaciones han considerado la altitud, la condición del terreno y el ambiente. (Romero, 2005) usó herramientas SIG para el cálculo de rutas óptimas para el desplazamiento en nuevos asentamientos urbanos. Se crean matrices ponderadas y vectores de desplazamiento para elegir caminos entre un punto y otro y se arman las rutas que consideran parámetros no solo como la distancia y el tiempo, sino como la zona de tránsito de vehículos, la elevación del terreno, las redes de comunicación, entre otros.

Los algoritmos dinámicos son otra línea de investigación que explica los fenómenos que presentan un comportamiento dinámico en el tiempo, e.g. la cantidad de carga que lleva el vehículo, la cantidad de clientes que se deben visitar. Estos algoritmos fueron estudiados por (Slater, 2002) en un sistema de entregas programadas para un negocio de comercio electrónico.

(Ritzinger, Puchinger, & Hartl, 2014) plantea una solución híbrida para los problemas dinámicos mediante métodos exactos y heurísticas de búsqueda local y la creación de un *framework* que soporta ventanas de tiempo cambiantes, i.e. problemas donde el tiempo de atención de cada cliente puede ser distinto según el servicio que se le prestará.

Los métodos de solución *online* se valen de las redes de telecomunicaciones para poder transmitir los datos o parámetros a los algoritmos. En el ruteo de vehículos *online* la transmisión de datos se hace vía GRPS o Satelital y se procesa y mediante los SIGs, como los analizados en (Karimi, Peachavanish, & Peng, 2004). También existen estrategias que consideran los tiempos de viaje y la generación de una solución en tiempo real para la actualización de las rutas. (Ebensperger Palacios, 2009)

(Liao & Hu, 2011) proponen un *framework* o marco de trabajo para la solución de problemas con características no determinísticas y con cambios dinámicos en el tiempo, e.g. problemas donde no se conoce de antemano cual será la demanda del producto transportado y que además introducen un monitoreo de tráfico de las rutas para analizar los tiempos de desplazamiento hacia los clientes, como principal característica está el poder solucionar en

tiempo real problemas de complejidad superior a los problemas de una variable, e.g tiempo o distancia o capacidad de los vehículos, con tiempos de respuesta inmediatos.

(Du, Han, & Li, 2014) analizan las soluciones *online* para poder presentar rutas sobre el tráfico de la ciudad basados en la comunicación entre los vehículos y con la red, convirtiendo los agentes de transporte en generadores de información para el sistema. La red que se puede armar con varios vehículos y la comunicación que existe entre estos y la infraestructura a su alrededor también es parte de las soluciones *online* relacionadas con el ambiente. Una propuesta de ruteo basado en estas redes es la de (Bilal, Bernardos, & Guerrero, 2013)

Dentro de las soluciones actuales a nivel de software para la solución de VRP, se puede mencionar el trabajo realizado por (Gutiérrez, Palacio, & Villegas, 2007) que hacen una reseña del *software* disponible en Colombia orientado a este propósito y concluyen que las aplicaciones computacionales permiten dar soporte a las decisiones del diseño de rutas por lo que las empresas de transporte deberían poner en consideración el uso de estos componentes de software para la creación de las rutas.

Otras investigaciones muestran el trabajo realizado para desarrollar herramientas computacionales para la solución de VRP, e.g (Papinski & Scott, 2011) usan un SIG para la solución de VRPs. Consideran un aspecto esencial para esta tesis: *las rutas que eligen los seres humanos no siempre se hacen con base en modelos matemáticos* sino con base en la experiencia que implica el conocimiento previo de cómo hacer un recorrido y la forma como cambia con el tiempo. Para ello se deben considerar las decisiones humanas en los modelos de solución planteados y analizar cómo influyen en la programación de las rutas. La investigación de Papinski y Scott es de las pocas donde se plantea que las *rutas observadas, históricas y basadas en esta experiencia* son las más usadas por las personas, aunque haya rutas óptimas en términos de las variables de interés, e.g. distancia, tiempo.

Otro tipo de *software* muy usado para el VRP y la visualización de los vehículos es Google Maps. (Laguna, 2008) desarrolló una solución que permite usar esta herramienta para optimizar las rutas basado en criterios de distancia y tiempo.

(Vidal, Crainic, Gendreau, & Prins, 2014) propusieron un *framework* (marco de trabajo) de múltiples atributos (24 en total), tales como el número de destinos, flotas heterogéneas, costos de carga, ventanas de tiempo, tiempos de viaje, tiempos de descanso entre otros, que

busca solucionar varios de los problemas descritos, mediante algoritmos de búsqueda local y algoritmos genéticos.

El VRP no solo se enfoca en el transporte de mercancía o de pasajeros, sino que también es usado para la creación de estrategias de evacuación de personas en caso de emergencias. Esta propuesta fue investigada por (Cano P, 2011)

En esta tesis se plantea una alternativa a los VRPs enriquecidos que está orientada a buscar los recorridos previos que hayan hecho los vehículos de una flota con base en las rutas históricas; de tal forma que se pueda revisar la ejecución de las programaciones que se hacen de los vehículos.

Como la transmisión de datos se realiza en tiempo real, existen métodos de comunicación y arquitecturas como los GPRS, la comunicación satelital, los RFID (*Radio Frequency Identification*) (Aguiar, Nunes, Silva, & Elias, 2009), entre otros, que permiten obtener los datos necesarios para un análisis que se oriente a *tomar decisiones en tiempo real sobre el estado de los vehículos y se pueda saber que tan acorde está con el itinerario o programación inicial planeada con base en eventos de monitoreo históricos*. Este aspecto es al que apunta esta investigación.

A continuación, se describen algunos artículos (estados del arte) relacionados con esta investigación.

(J. Pirabán, 2008). Soluciones aproximadas del VRP, mediante heurísticas, donde se analizan los estudios que se han hecho sobre los entornos reales de aplicación del VRP y las propuestas de solución actuales.

(Lüer et al., 2009) Presentan el problema inicial del VRP, las extensiones del modelo original y muestran los métodos de solución exactos, heurísticas, meta heurísticas y algoritmos híbridos, que se han utilizado para encontrar solución al problema de ruteo.

(Victor Pillac et al., 2011) presentan un estado del arte de los VRPs dinámicos que existen. Separan los VRPs en cuatro tipos: los determinísticos estáticos, los determinísticos dinámicos, los estocásticos estáticos y los estocásticos dinámicos. Para esta tesis interesan los problemas determinísticos y estocásticos dinámicos, porque son los que tienen más similitud con el comportamiento de las flotas de vehículos en la vida real.

(De Jaegere, Defraeye, & Van Nieuwenhuysse, 2014) declaran en ese estado de arte, que solo el 4.17% de los artículos estudiados (ver tabla 3-1) corresponden a soluciones en tiempo real.

Tabla 3-1: Revisión de los métodos aplicados. Adaptado de (De Jaegere et al., 2014)

Método aplicado	Número de artículos (total = 144)	Presencia relativa
Meta heurísticas	104	72,22%
Heurísticas clásicas	26	18,06%
Métodos exactos	20	13,89%
Simulación	7	4,86%
Métodos de solución en tiempo real	6	4,17%

(Prodhon & Prins, 2014) analizaron las investigaciones sobre los problemas de localización de vehículos y el tipo de posicionamiento que tienen con respecto a los depósitos y a los clientes.

(Lahyani et al., 2015) hicieron una recopilación de los VRPs enriquecidos y los clasificaron según las características del escenario ambiente donde se mueven los vehículos y según las características de los problemas físicos asociadas al problema.

(Cáceres Cruz, 2013) estudió varios tipos de VRPs enriquecidos y los diferentes métodos de solución propuestos, abordando la integración de heurísticas, probabilidad sesgada, simulación, técnicas de computación distribuida & paralelas, y programación con restricciones.

Con base en estos artículos y estudios previos, esta tesis aborda aspectos que muy pocas o ninguna de las anteriores investigaciones contemplan:

- La fuente de análisis de datos son las rutas históricas de los vehículos, de tal manera que se tendrán puntos de partida reales para el problema.
- Como las soluciones de ruteo obedecen a rutas previas a la ejecución de anteriores itinerarios por parte de los conductores serán la base principal para determinar las rutas.
- Los algoritmos de solución no serán exactos y tendrán un re-procesamiento con datos históricos almacenados en una bodega de datos donde se tendrán datos sobre las variables más importantes para la operación de la flota de vehículos. Estas variables se podrán considerar o no, según las necesidades del analista del problema. Es decir, si para una persona es más importante la velocidad promedio en que se recorrió una ruta se considerará esta variable, mientras que para otra persona lo más importante podría ser el total de kilómetros recorridos.
- En esta tesis *no se pretende optimizar las rutas* sino hacer un seguimiento de la ejecución de una ruta para poder saber que tanto porcentaje de cumplimiento o desfase se lleva en tiempo real y poder tomar decisiones en el momento, sobre la ejecución de la programación de los vehículos y *poder reprogramar la forma como se deben desplazar los vehículos* con el fin de ajustar la programación inicial a una programación que tome datos de ejecuciones reales.

Considerando las propuestas de solución analizadas hasta el momento (ver tabla 3-2) y dada la poca atención a los problemas de ruteo con eventos históricos de monitoreo, el siguiente capítulo se enfoca en revisar el proceso de asignación de rutas actual y se muestra un análisis que considera una base de históricos de rutas.

Tabla 3-2: Comparativa de estrategias de solución (Elaboración propia)

	Año	Algoritmo Exacto	Heurísticas	Meta heurísticas Búsqueda Local	Meta heurísticas Evolutivos	Algoritmo Online	Algoritmo Dinámico	Algoritmos basados en el ambiente	Algoritmos basados en hechos históricos
(Dijkstra, 1959)	1959	X							
(Hermosilla & Barán, 2004)	2004				X				
(Karimi et al., 2004)	2004					X			
(Krumke, 2001)	2001					X			
(López Pérez & Badii, 2004, 2005)	2005				X				
(Olivera, 2004)	2004		X						
(Slater, 2002)	2002						X		
(Contardo Vera, 2005)	2005	X	X			X	X		
(Zabala & Torres, 2005)	2005				X				
(Olivera, 2005)	2005			X					
(Reinhardt, 2005)	2005							X	
(Romero, 2005)	2005							X	
(Quintero, 2005)	2005				X				
(Applegate et al., 2007)	2007	X							

Metodología AVL y ruteo de vehículos con base en eventos históricos de unidades de monitoreo.

	Año	Algoritmo Exacto	Heurísticas	Meta heurísticas Búsqueda Local	Meta heurísticas Evolutivos	Algoritmo Online	Algoritmo Dinámico	Algoritmos basados en el ambiente	Algoritmos basados en hechos históricos
2007)									
(Cortés Puchades et al., 2008)	2007	X							
(Laguna, 2008)	2008					X			
(Perosio & Zunino, 2008)	2008			X					
(J. Pirabán, 2008)	2008	X	X	X	X				
(Aguir et al., 2009)	2009					X			
(Daza et al., 2009)	2009			X					
(Duarte Alleuy, 2009)	2009			X					
(Lüer et al., 2009)	2009	X	X	X	X				
(Martinez Quijano, 2010)	2010	X		X	X				
(Tomalá Robles & Villa Pincay, 2010)	2010				X				
(Correa Espinal et al., 2011)	2011	X							
(Liao & Hu, 2011)	2011					X	X		
(López Castro, 2011)	2011				X				
(Papinski & Scott, 2011)	2011						X	X	X

Metodología AVL y ruteo de vehículos con base en eventos históricos de unidades de monitoreo.

	Año	Algoritmo Exacto	Heurísticas	Meta heurísticas Búsqueda Local	Meta heurísticas Evolutivos	Algoritmo Online	Algoritmo Dinámico	Algoritmos basados en el ambiente	Algoritmos basados en hechos históricos
2011)									
(Victor Pillac et al., 2011)	2011	X	X	X	X		X		
(Qi et al., 2011)	2011			X					
(Cano P, 2011)	2011							X	
(Lahyani et al., 2015)	2015	X	X	X	X	X	X		
(De Jaegere et al., 2014)	2014	X	X	X	X	X	X		
(Du et al., 2014)	2014					X	X	X	
(Prodhon & Prins, 2014)	2014	X	X	X	X				
(Ritzinger et al., 2014)	2014	X		X					
(Vidal et al., 2014)	2014			X	X				
(Bilal et al., 2013)	2013					X	X	X	
(Cáceres Cruz, 2013)	2013	X	X	X	X		X		
(Galván et al., 2013)	2013				X				
(Kao & Wang, 2013)	2013	X	X	X	X				
(Baldacci et al.,		X							

Metodología AVL y ruteo de vehículos con base en eventos históricos de unidades de monitoreo.

	Año	Algoritmo Exacto	Heurísticas	Meta heurísticas Búsqueda Local	Meta heurísticas Evolutivos	Algoritmo Online	Algoritmo Dinámico	Algoritmos basados en el ambiente	Algoritmos basados en hechos históricos
2012)									
(Rojas Mejías, 2012)			X				X		
(Rojas Mejías, 2012)			X						
(García, 2012)					X				
(Isaza, 2012)			X	X					
TESIS	2016					X	X		X

4. PROPUESTA DE SOLUCIÓN Y VALIDACIÓN

En esta sección se presenta la propuesta de solución que incluye los siguientes puntos.

- Motivación y estado actual de las principales compañías de vehículos.
- Proceso de asignación de rutas.
- Recolección de datos a través del tiempo.
- Metodología de análisis de datos y descubrimiento de comportamientos en las rutas.
- Validación del proceso con la propuesta de solución

4.1 Motivación y estado actual de las principales compañías de vehículos

Uno de los aportes fundamentales de esta tesis es proponer un modelo para un sistema de soporte a la decisión que utilice los datos históricos de los viajes de los vehículos. Para hacer esto se necesita de un proceso de Geo-BI y en ocasiones tener informes personalizados para cada cliente.

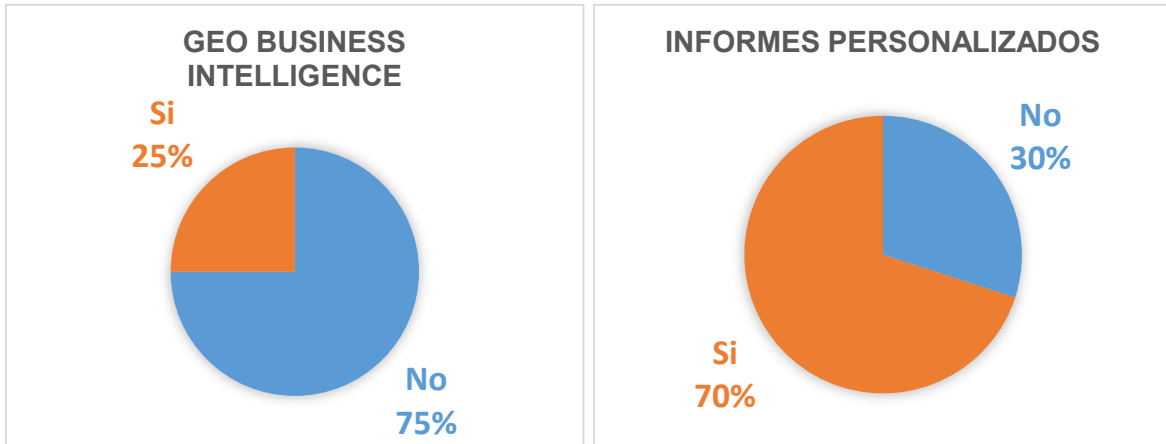
Investigando sobre estos procesos en las mejores 20 empresas del sector de monitoreo de vehículos del mundo según el Top Fleet Management Software publicado en (Capterra, 2015) se analizó el portafolio de servicio que muestran en las páginas web oficiales de cada empresa, buscando dos características muy importante, en las empresa de monitoreo de vehículos actualmente: Análisis mediante procesos de Geo- BI e Informes personalizados para los clientes.

También se descubrió que algunas de estas empresas de monitoreo de vehículos, permiten elaborar a sus clientes, informes personalizados, en los cuales pueden elegir las variables de interés de consulta de la flota de vehículos.

Por otro lado, la ausencia de procesos de GEO – BI es bastante notoria como lo muestra la figura 4-1, debido a que en porcentaje de si realizan o no procesos de esta índole; solo

una cuarta parte de las principales empresas llevan a cabo estas actividades. (Ver anexo D) ¹

Figura 4-1: Geo-BI e Informes personalizados en las 20 mejores empresas de monitoreo de vehículos.



Este análisis permite conocer la pertinencia de realizar procesos de BI en la actualidad y demuestran que es un tema que aún no ha sido tan ampliamente explorado y con una proyección amplia de investigación, sobre todo en el tema de Geo-BI para el análisis del ruteo de vehículos con base en eventos históricos.

4.2 Proceso de asignación de rutas

El proceso de asignación de rutas en las empresas de transporte, según lo analizado en las entrevistas a los expertos y gestores de flota (ver 4.4), surge cuando existe la necesidad de enviar vehículos de una compañía desde un origen hasta un destino. Si la compañía no cuenta con un proceso estructurado de despacho de vehículos, usualmente se recurre a una programación manual en la que se da un origen y un destino geográfico a un vehículo. Si se necesita hacer seguimiento a un vehículo, se puede optar por

¹ Los datos fueron obtenidos de una investigación en las páginas oficiales de cada empresa. Y dependen de lo que revelan al público en general.

llamadas telefónicas, informes de paso por un sitio (en el que una persona está pendiente de informar cuando el vehículo pase por dicho sitio).

Para las compañías que presentan un despacho de vehículos estructurado, el proceso comienza usualmente con la creación de rutas por las cuales transitarán los vehículos.

Para ello se requiere conocer un sitio de origen y otro de destino y una forma de realizar la ruta, e.g. a través de diferentes vías de transporte.

Además, para llevar a cabo un proceso más avanzado de monitoreo, se suelen crear puntos de referencia virtuales conocidos como *puntos de control* que sirven para registrar el tiempo de paso de los vehículos por dichos puntos y así poder determinar durante el transcurso de la ruta la evolución de un vehículo: cuanto se ha demorado y estimar el tiempo restante para su llegada al destino.

El encargado de la creación de una ruta, denominado *gestor de flota*, define tiempos de tránsito entre el origen y cada uno de los puntos de control y entre el último punto de control y el destino, de esta forma la suma de estos tiempos corresponde al tiempo total (estimado o planeado) de la ruta.

Luego de la creación de la ruta, el despachador de la flota procede a asignar los viajes de acuerdo con las necesidades, i.e. asigna un vehículo a una ruta. A este proceso se le denomina ruteo de vehículos.

Cuando el vehículo deja su punto de origen camino a su destino, se monitorea el vehículo con el fin de saber su posición, el tiempo transcurrido en el viaje y conocer cualquier otra variable de interés, como el consumo de combustible, la temperatura del furgón en caso de transporte de mercancía perecedera, la velocidad, las aceleraciones y frenadas bruscas, entre otras.

Para el monitoreo es fundamental la medición de tiempos entre los puntos de control, por lo que se debe comparar el tiempo real de cada paso frente al tiempo planeado. Para esto se suelen usar mecanismos de monitoreo provistos por una empresa mediante unidades que envían constantemente los eventos con los datos de posición del vehículo y otros datos de interés para la compañía dueña de la flota.

¿Qué problemas surgen al revisar la programación manual y el proceso de asignación de rutas de las compañías estructuradas?

Las programaciones manuales, i.e. las realizadas por el gestor de las rutas de acuerdo a decisiones propias y no a unos lineamientos claros y establecidos por las compañías, no incluyen rutas definidas con sus respectivos límites, sitios de origen y de destino, regiones de tránsito de la ruta, puntos de control que permitan monitorear el vehículo o si los tienen dependen del conductor del vehículo; además se debe confiar en que el conductor vaya hasta el destino por la ruta que se le haya indicado o por una ruta que él/ella conozca según su experiencia. Como consecuencia, los puntos de control de un informe manual pueden ser imprecisos y en ocasiones simplemente no se hacen. El control de tiempos puede ser impreciso porque los tiempos se pueden modificar premeditadamente por un acuerdo entre el conductor y la persona que informa el paso por punto de control.

Para las programaciones estructuradas, i.e. las que realizan las empresas de acuerdo a lineamientos previamente establecidos y organizados, se tiene un control mucho mayor sobre las rutas y los tiempos; sin embargo, se evidencian algunos problemas como los siguientes:

La creación de la ruta por parte del gestor de la flota dependerá de su experiencia, de su conocimiento del territorio geográfico y de las consultas que formule sobre la red vial del país.

Pero en realidad ¿toman los conductores en sus viajes la ruta que se les ha asignado?

Figura 4-2: Abandonos por viaje.



En una consulta realizada en las bases de datos de Satrack para 15 días de una muestra de 70302 viajes hechos por 3268 vehículos, se visualiza que se presentaron 51426 abandonos de ruta en los viajes. Esto significa que, para la muestra, 36% de los viajes presentan un abandono en por lo menos un momento en la ruta asignada. Esto muestra que no se suelen cumplir en su totalidad las rutas creadas y programadas por los gestores de flota y que un porcentaje significativo de conductores toma rutas distintas de las asignadas.²

En cuanto al monitoreo (ver 2.1.1) hecho en los puntos de control, al ser automático se evitan los problemas de índole humano. Sin embargo, tanto para la programación y el despacho de vehículos manual y automático hay un problema que afecta la revisión de la ejecución de los viajes y es el monitoreo de tiempos en toda la ruta frente a los programados.

En primer lugar, las personas que crean las rutas deben decidir los tiempos que *debería* demorarse un vehículo desde que sale hasta que llega a su destino, incluyendo los tiempos parciales hasta los puntos de control.

¿Cuál es la base para definir los tiempos en la creación de la ruta? Usualmente es la experiencia y el conocimiento del gestor de la flota (y en ocasiones con la ayuda de los conductores) que se tenga de los tiempos *aproximados* para un viaje conocido.

Sin embargo, en la ejecución de una ruta, pueden influir muchas variables para su cumplimiento: puede haber demoras por tráfico lento, por accidentes, por problemas mecánicos o de la vía, por detenciones por parte del conductor o por lo contrario pueden existir viajes con tiempos menores debido al horario del viaje (e.g. en la noche puede haber menos congestión de tráfico), al tamaño del vehículo, a la cantidad y al tipo de carga que se transporte, entre otros aspectos.

Esto sugiere que definir los tiempos con base solo en la experiencia o considerando los tiempos de los últimos viajes puede generar un problema de desfase entre lo presupuestado y lo realmente ejecutado.

² Los abandonos de ruta pueden ser momentáneos, lo que no indica que un abandono de ruta sea el final de la ruta, sino que indica que algo estuvo mal en la creación o ejecución de la ruta.

De hecho, el proceso normal que se hace es comparar un viaje que se esté realizando en el momento frente a lo presupuestado, algo que no es apropiado pues se están omitiendo los viajes que se han hecho para ese mismo trayecto por parte del mismo vehículo o conductor o de vehículos similares en la flota.

Por lo tanto, si se analizan los datos de esta manera, en los casos de logística de operaciones se calificaría un viaje tomando como referencia un solo viaje o unos cuantos viajes actuales, lo que puede ser insuficiente para el análisis de una ruta.

Por esta razón se propone como solución para el análisis de los datos de ruteo de vehículos, la utilización de eventos históricos de monitoreo para *determinar el comportamiento de los vehículos dentro de una ruta, para tomar acciones orientadas a la mejora de la creación y asignación de rutas y a realizar un monitoreo que no sea basado solo en cálculos matemáticos exactos o aproximados, sino que también tenga en consideración variables de las ejecuciones reales de las rutas.*

4.3 Recolección de datos a través del tiempo

Los vehículos que son monitoreados mediante tecnologías AVL son los *objetos de estudio* de esta tesis y son los que ofrecen los datos necesarios para la solución propuesta, a diferencia de los vehículos que se les hace seguimiento manual y que usualmente no cuentan con datos históricos de monitoreo.

A cada vehículo que se debe monitorear se le instala una unidad de monitoreo, i.e. un dispositivo de *hardware* que cuenta con un módulo de posicionamiento GPS que se encarga de mantener actualizada la posición geográfica de un vehículo cada determinado tiempo, configurable desde la programación inicial de la unidad y modificable mediante comandos de programación enviados a la unidad mediante señales de radio.

Una posición geográfica como mínimo tiene una latitud y una longitud, i.e. las coordenadas geográficas que sirven para ubicar cualquier objeto en el globo terráqueo.

Las unidades de monitoreo se programan para que vía GPRS o vía satelital generen eventos de monitoreo. Estos eventos son enviados a una entidad de transmisión de datos, usualmente una empresa prestadora de servicios celulares o de servicios satelitales, que

reciben una trama hexadecimal que encapsula los datos de monitoreo. Dichas empresas envían los datos, a través de la red de internet, a servidores de procesamiento y almacenamiento de datos en empresas de monitoreo de vehículos.

El procesamiento que se da a las tramas de datos depende de cada empresa, pero típicamente se identifica el tipo de trama y se empieza a procesar byte a byte para obtener los elementos que componen un evento de monitoreo.

Un evento de monitoreo puede contener los siguientes elementos:

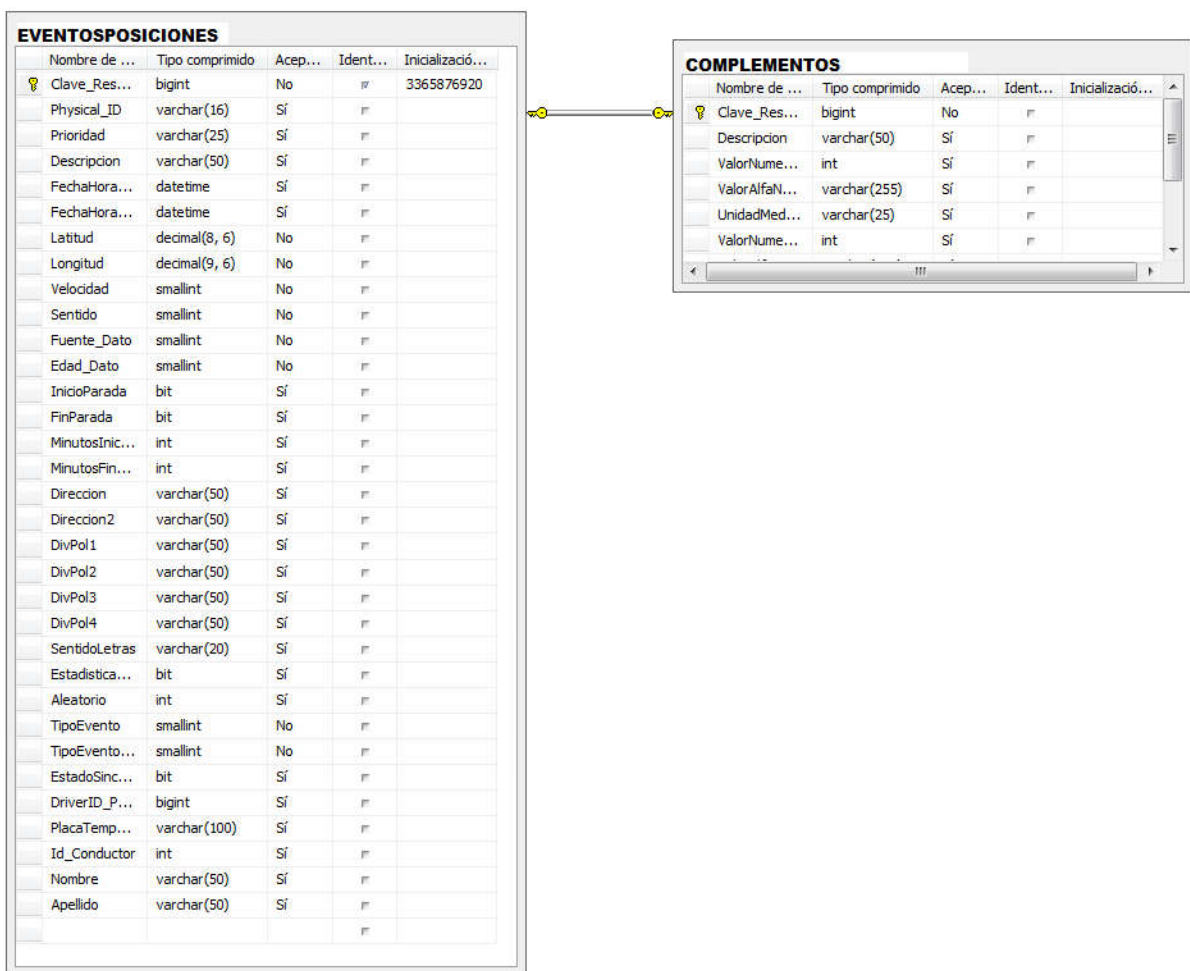
- Identificador único del evento. (e.g. 71863239313)
- Identificador del vehículo (e.g. Placademo1)
- Prioridad del evento (e.g. Archivar)
- Descripción (e.g. Ingreso a región)
- Fecha del evento (e.g. 2015-05-02 15:35:26)
- Fecha de llegada del evento al sistema (e.g. 2015-05-02 15:35:27)
- Latitud (e.g. 4.356245)
- Longitud (e.g. -75.256512)
- Altitud (e.g. 1500)
- Velocidad (e.g. 55)
- Sentido (con respecto al Norte) (e.g. 270)
- Dirección (e.g. Calle 24 # 89-75)
- Tipo de evento (e.g. 101)
- Ignición (estado del vehículo) (e.g.1)

Aparte de estos elementos puede contener muchos más datos dependiendo del tipo de evento, que es conocido como “complemento del evento” y que suele incluir datos del conductor, temperatura, tiempos de excesos (velocidad, frenadas y aceleradas bruscas) estado de las puertas, estado de las entradas y salidas de los puertos de la unidad, entre otros.

Se pueden generar varios eventos por minuto por cada vehículo dependiendo del tiempo de envío configurado (frecuencia de generación de eventos) o de la aparición de un evento que se envíe de inmediato debido a su prioridad e importancia, e.g. un botón de

pánico (evento que se envía, e.g. cuando el conductor solicita atención urgente debido a un hurto o un accidente).

Figura 4-3: Diagrama de la estructura de datos: EventosPosiciones y sus complementos (Elaboración propia)



Cuando un evento se procesa en el sistema de recepción de eventos, i.e. en la empresa de monitoreo, este pasa por una serie de procedimientos almacenados en las bases de datos para obtener información de los datos para cada uno de los módulos de ingreso de los eventos de la compañía y que es destinada para el procesamiento individual del comportamiento del vehículo o del conductor.

En cuanto a los eventos con información exclusiva de las rutas, se tiene un procesamiento diferente, pues estos son válidos solo si existe una programación por parte del gestor de la flota, en otros casos son omitidas.

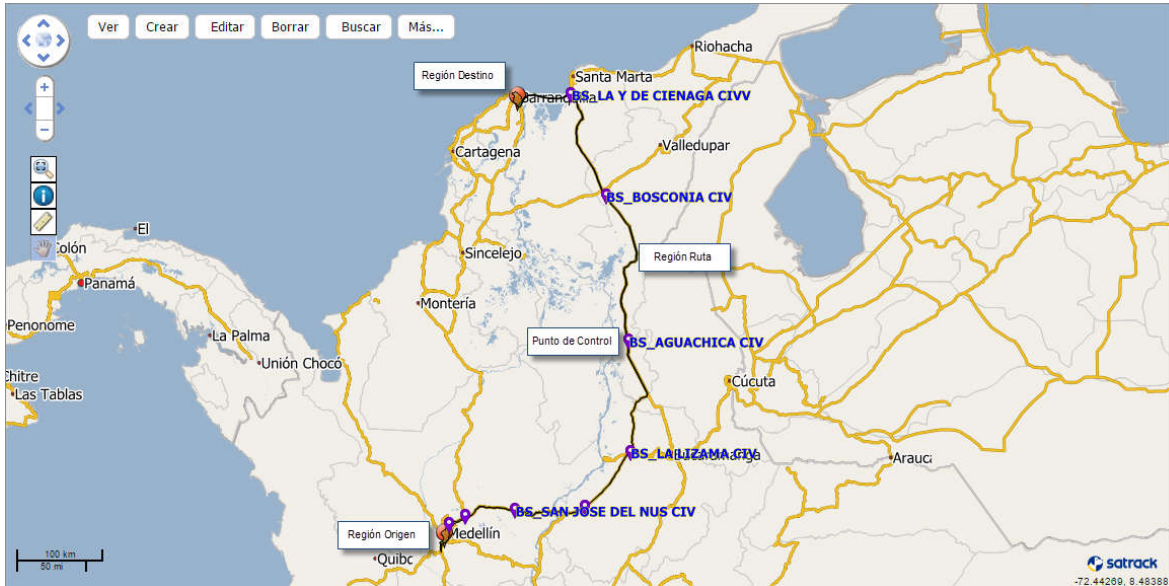
Como se ha mencionado una ruta se compone de:

- Región de origen.
- Región de ruta
- Puntos de control
- Región de destino.

En ocasiones también puede incluir otras regiones especiales de carga/descarga que representan zonas donde se harán paradas o detenciones para hacer intercambio de carga.

Los eventos de monitoreo de un viaje comienzan cuando el vehículo abandona la región de origen.

Figura 4-4: Configuración de una ruta (Elaboración propia)



A partir de ese momento son eventos propios de una ruta programada: evento de abandono de ruta, de paso por un puesto de control, de ingreso a una región destino, de inicio de una pausa programada, de fin de una pausa programada; o las alarmas que se generan en el sistema, e.g. paso con retraso por puesto de control, paso con antelación por puesto de control, sin reporte de paso por puesto de control, tránsito en horario no permitido, etc.

Cuando los eventos son procesados en el sistema, la información de las rutas y el paso por los puntos de control se almacenan en estructuras de la base de datos. (Ver figura 4.3)

4.4 Modelo de análisis de datos y descubrimiento de comportamientos de los vehículos en las rutas.

A continuación, se presenta una parte del proceso mediante el cual se analiza el

comportamiento de los vehículos en las rutas que se han almacenado en la BD de Satrack (compañía de monitoreo que sirvió de proveedora de los datos para esta investigación) durante más de tres años.

Para comenzar se describe un entorno típico de procesamiento de datos en un sistema de Geo-BI, en el cual se tienen datos de diferentes fuentes. Los datos que se pueden tener a partir de los conjuntos de datos (*datasets*) de las fuentes origen pueden ser datos geoespaciales como posicionamiento, datos demográficos, datos hídricos, datos del clima, entre otros.

Muchos de estos datos son esenciales para el entorno transaccional y permiten responder de manera inmediata consultas cuyo horizonte de tiempo incluye datos recientes (e.g. datos del último año). Sin embargo, el tiempo de respuesta de las consultas puede aumentar (horas, días) cuando se procesan grandes volúmenes (gigabytes, terabytes) de datos históricos. Por eso estos datos se suelen llevar mediante un proceso de ETL (extracción, transformación y carga) a un ambiente de análisis adecuado para trabajar con tales volúmenes de datos.

Figura 4-5: Flujo de trabajo en un proceso de análisis de Geo-BI (Wickramasuriya, Ma, Berryman, & Perez, 2013)

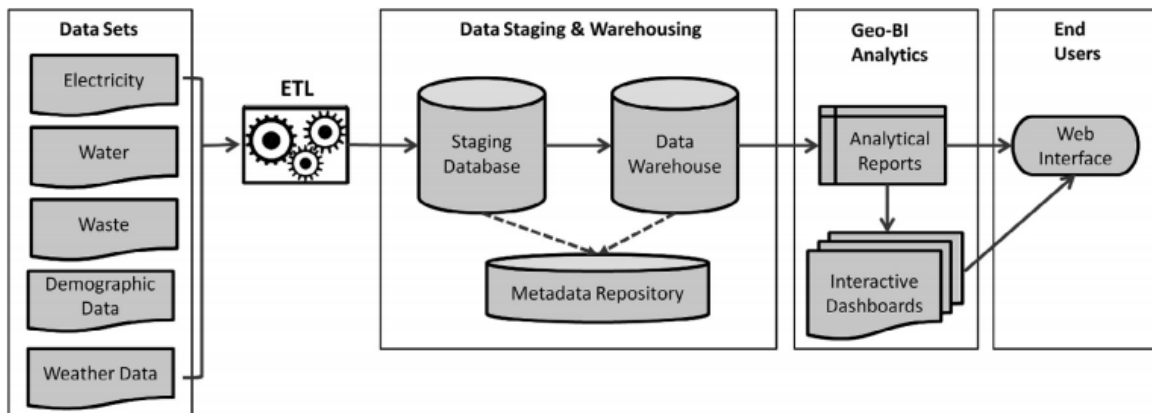


Tabla 4-1: Comparativa entre datos operativos y datos de un DSS (Moreno, 2013)

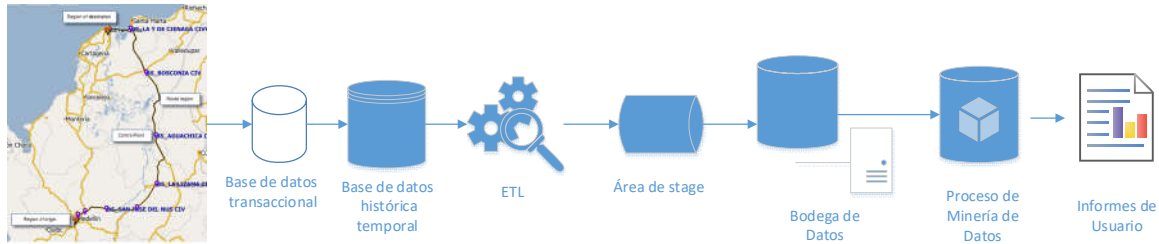
Datos operativos	Datos DSS
Altamente normalizados	Desnormalizados - Consolidados
Registros diarios	Registros de periodos Datos Históricos
Varias tablas relacionales	Jerarquías de agregación e.g: Localidad → Ciudad → Departamento- > País
Muchas tablas, pocos atributos	Pocas tablas, muchos atributos
Actualización constante	Actualización en lotes
Tablas pequeñas	Grandes tamaños
Orientados a transacciones	Orientados a consultas

Los datos de un DSS (sistema de soporte a la decisión) son almacenados en una bodega de datos para su posterior análisis.

El almacenamiento de datos suele cubrir un horizonte de varios años para poder disponer de fuentes históricas de referencia para los informes de análisis de datos y para la visualización de los resultados para el usuario final.

Uno de los principales propósitos por los que se hace un proceso de Geo - BI es el poder brindarle a un usuario final la capacidad de toma de decisiones sobre sus responsabilidades, con base en el análisis de los datos. En la solución propuesta para el análisis de datos históricos de rutas de vehículos se hace un proceso similar que se ilustra en la figura 4-9.

Figura 4-6: Proceso de extracción del conocimiento propuesto



Todos los datos de informes de las unidades de monitoreo se almacenan en BD transaccionales, donde se pueden consultar en tiempo real. Sin embargo, cuando un vehículo termina la ejecución de la ruta, i.e. llega a la región destino, se migran todos los datos a una base de datos histórica donde se almacenan durante 15 días o un mes.

Posteriormente, un proceso de ETL se encarga de migrar periódicamente los datos de las rutas a tablas en un área intermedia y temporal de almacenamiento donde se trata de detectar datos duplicados, se limpian los datos (proceso denominado *data cleansing*, e.g. se eliminan los datos nulos o las fechas de monitoreo incorrectas i.e. las que corresponden a fechas en el futuro o en años que no correspondan al real) y se eligen solo los datos de viajes terminados exitosamente.

Un caso de éxito se establece cuando un vehículo abandona la región de origen, continua su viaje a través de la ruta y llega al destino. Este proceso a nivel de almacenamiento de datos se puede visualizar cuando se toman los tiempos de los eventos de salida de la región origen (un evento donde se indique que la posición geográfica del vehículo está por fuera de dicha región) y de entrada a la región destino (un evento donde se indique que la posición geográfica del vehículo está dentro de dicha región); si no hay un registro de ambos eventos, se supone que la ruta no se hizo con éxito o que se canceló y; por lo tanto, no entra en el proceso de análisis de las rutas.

El proceso de ETLs, almacena los datos en la bodega de datos por varios años, después de hacer el proceso de limpieza, mediante un modelo con esquema de estrella donde la tabla de hechos (*factViajes*) almacena las rutas exitosas y las tablas de dimensiones almacenan los datos que permiten seleccionar, agrupar o seccionar (*slice and dice*) los datos de las rutas. (Ver figura 4-7).

Las dimensiones son:

- DimRutas: Dimensión donde se almacenan todas las posibles rutas de la compañía de monitoreo
- DimDate: Dimensión de fechas que almacena todos los datos a partir del año de inicio de elección para el modelo.
- DimTime: Dimensión de tiempo correspondiente a las horas, minutos y segundos de un día. Se diferencia de la dimensión DimDate por si se requiere hacer análisis independientes de las fechas, pero dependientes de las horas del día.
- DimVehiculos: Se almacenan todos los datos de los vehículos automotores que realizan los viajes programados.

Con este modelo se puede realizar consultas OLAP para hacer la comparativa de las rutas programadas frente a las ejecutadas, también permite conocer el comportamiento de las rutas, los vehículos, las fechas y horas de tránsito entre otras.

Para estas consultas que se hacen sobre la bodega de datos se pueden utilizar selecciones jerárquicas de las dimensiones, i.e. se pueden hacer selecciones de agrupamiento o desglose.

A continuación, se presenta un caso de estudio que permite observar las bondades del modelo.

4.4.1 Caso de estudio – Modelo de ejecución.

Supóngase que se necesitan conocer las rutas ejecutadas durante un periodo por los vehículos de una compañía de monitoreo.

Se requiere que las fechas de consulta sean selecciones jerárquicas en los que se pueda tener el detalle de los viajes por fecha y la diferencia entre lo programado y lo ejecutado, pero que también se pueda agrupar de acuerdo con el tiempo.

Se elige entonces un año, un mes y un día, y se elige un código de identificación del cliente y las placas de consulta.

Metodología AVL y ruteo de vehículos con base en eventos históricos de unidades de monitoreo.

Figura 4-7: Esquema relacional del modelo. (Elaboración propia)

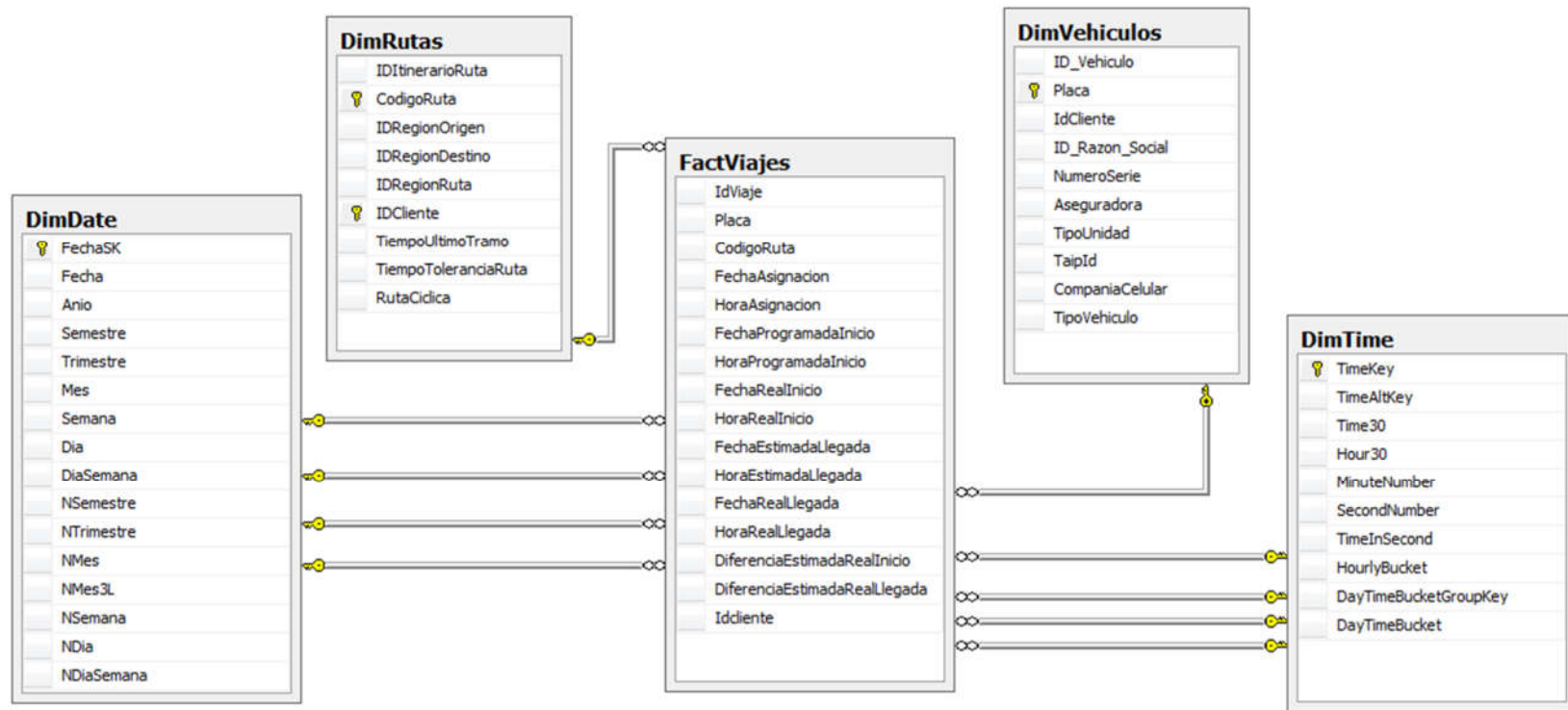


Tabla 4-2: Diferencias de tiempos para varias rutas.

Selección:				Selección jerárquica de fechas	
ID Cliente	11675				
Fecha Real Llegada.Jerarquía	2016-04				
	Placas				
	DemoPlaca1	DemoPlaca2			
	Diferencia Llegada Vs				
Rutas	Planeada		Total general		
003-0030099	1785				1785
20160418	1236				1236
20160419	-829				-829
20160420	-81				-81
20160421	-58				-58
20160423	1336				1336
20160426	-782				-782
20160427	212				212
20160428	211				211
20160429	540				540
003-0031099	-246		-579		-825
20160411			-350		-350
20160412			-229		-229
20160419	-246				-246
003-0033099	-560		-395		-955
20160418	-535				-535
20160421	-25				-25
20160424			-395		-395
003-0035099	-95		-114		-209
20160406			81		81
20160423	-93		-195		-288
20160424	4				4
20160426	-6				-6
003-0037099			-747		-747
20160402			-747		-747
Total general	884		-1835		-951

En la tabla 4-2 y la figura 4-8 se presenta un ejemplo para 2016-04 (año-mes), en el cual se seleccionan los datos del cliente 11675, de las placas Placademo1 y Placademo2 y para las rutas que comienzan por 003-00.

La selección Fecha Real Llegada. Jerarquía permite hacer operaciones de agrupación (*roll up*) y desglose (*drill down*) por fecha, i.e. se pueden hacer consultas por año, luego por mes y luego por día e ir desglosando los totales de las diferencias de los viajes realizados en estas fechas o se pueden agrupar si se realizan las operaciones en el sentido contrario (día->mes->año)

El modelo permite identificar las diferencias entre lo planeado y lo ejecutado.

A modo de ejemplo en la tabla 4-2 se puede observar desfases de 1336 segundos (22 minutos) en una sola ruta. (ver registro del día 20160423 de la ruta 003-0030099)

También permite comparar dos o más placas para la misma ruta en la misma fecha y determinar cual tuvo más desfase. (ver registro del día 20160423 de la ruta 003-0035099)

El modelo también permite formular consultas que combinan valores de las dimensiones del modelo (ver figura 4-9) para analizar la forma como se ejecutan los viajes por placas, por rutas, por fechas, por clientes, entre otros; y las combinaciones posibles entre estas variables.

Figura 4-8: Diferencias de tiempos para varias rutas por fecha. (Elaboración propia)

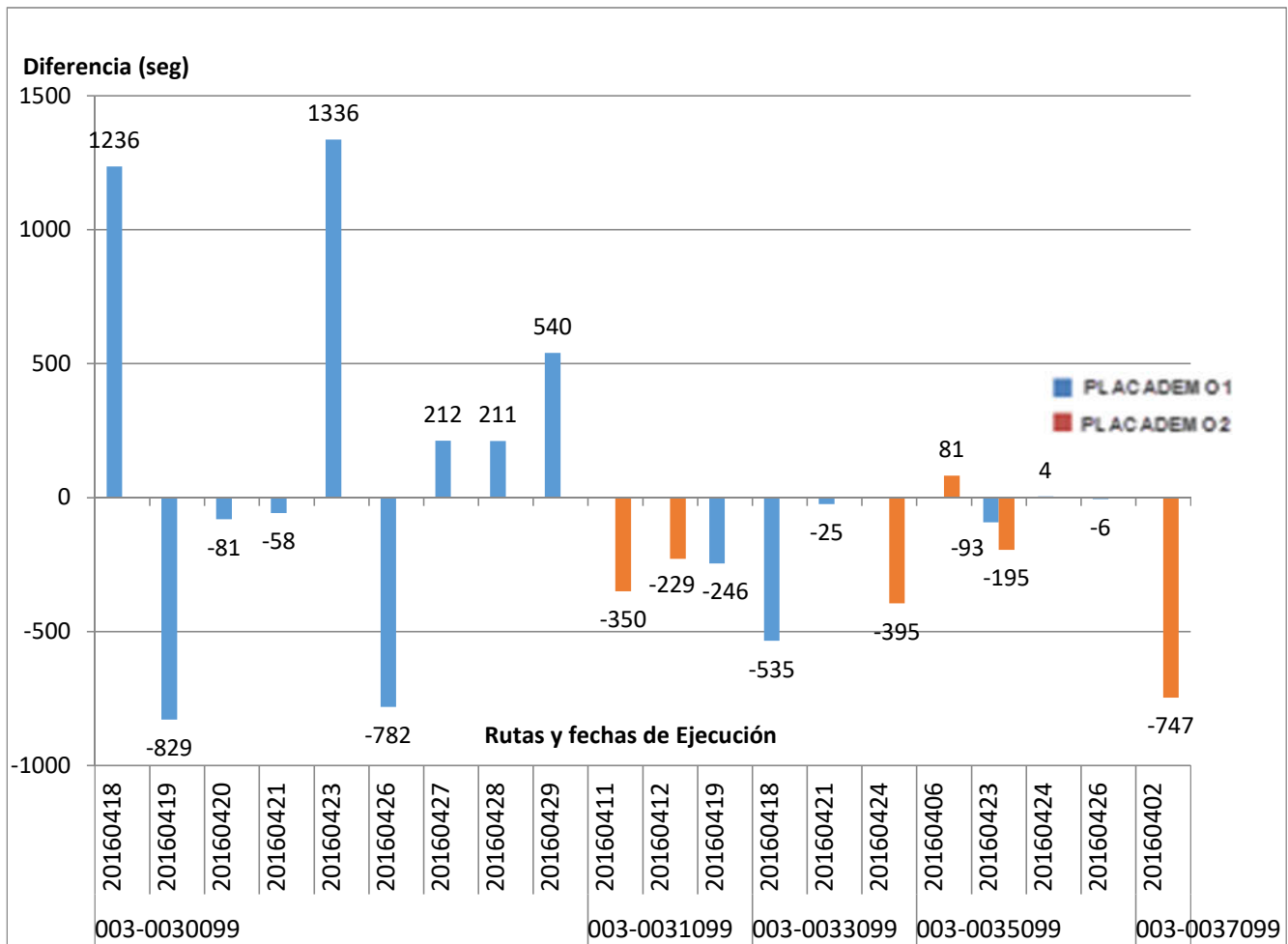
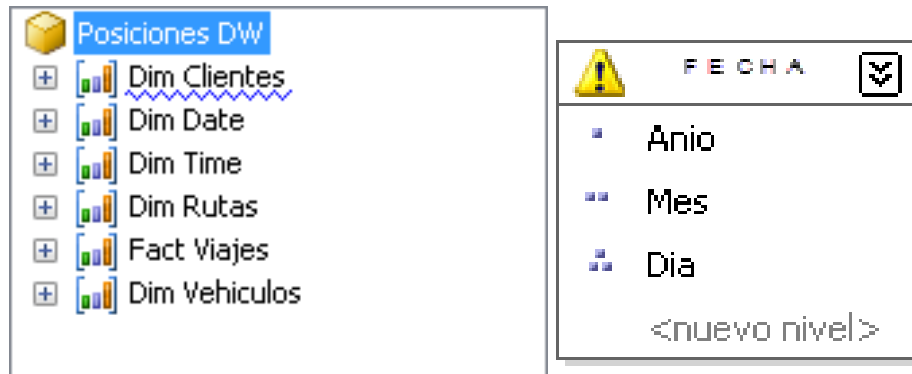


Figura 4-9: Dimensiones y niveles jerárquicos de la dimensión Fecha (DimDate)



Las jerarquías se pueden visualizar en el modelo, es posible, e.g. agrupar por el desfase total en la ejecución de las rutas según los niveles (día, mes y año).

Un de las principales ventajas del modelo es que permite a los dueños de flota obtener información *a priori*, i.e. antes de la ejecución de las rutas y de esta manera:

- Tomar decisiones sobre las rutas que se ejecutan eficientemente y sobre las que fallan; decisiones como la revisión del recorrido de la ruta, el tipo de vehículos a los que se asignará, control más eficiente del tiempo, horarios de viajes permitidos, expectativas de cumplimiento, entre otras.
- Asignar vehículos a las rutas según su comportamiento histórico.
- Hacer seguimiento a las rutas con mayor desfase para reconocer patrones de comportamiento que estén llevando a la incorrecta gestión de estas rutas.
- Identificar cuáles son los vehículos y conductores con mejores cumplimientos de la programación.
- Analizar las fechas en que mejor cumplimiento hubo (e.g. analizar el cumplimiento los fines de semana, los días festivos).

Muchas de estas ventajas no se presentan en modelos matemáticos exactos o en heurísticas de ruteo, pues estos modelos no analizan variables asociadas con los

históricos de los viajes.

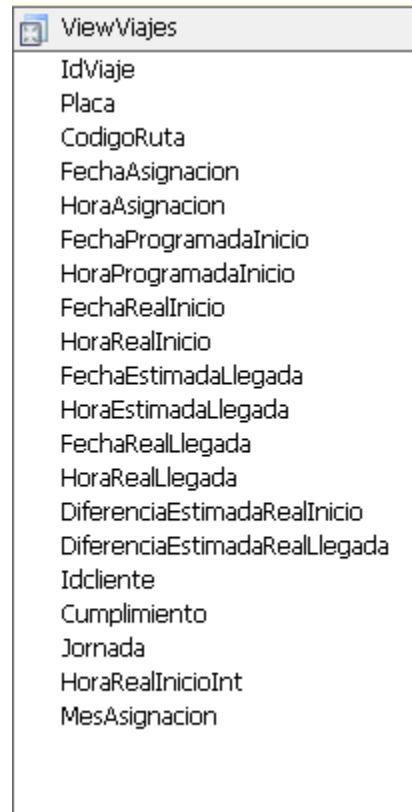
4.4.2 Análisis de comportamiento por minería de datos.

Otra parte del modelo propuesto en esta tesis, corresponde a un análisis de los datos por medio de minería de datos sobre la ejecución de las rutas para identificar las que tienen las más altas probabilidades de cumplimiento en una programación y descubrir patrones que revelen información acerca de las variables que más influyen en la ejecución de una ruta.

Se creó una variable discreta que representa el cumplimiento de una ruta (variable lógica) cuyos valores son cero (0) o uno (1) y se parte de la premisa de que una programación cumple (1) si está en un umbral dado en minutos, más o menos de lo programado; si supera este umbral se considera como incumplimiento (0). Para los ejemplos de esta tesis, dicho umbral es de 15 minutos.

Se define una vista a partir del modelo de la bodega de datos. La vista incluye datos de la tabla de hechos, los datos de las dimensiones correspondientes y la variable discreta para el análisis de las ejecuciones.

Figura 4-10: Vista de viajes ejecutados.



Para esta vista se han calculado algunas variables que permiten conocer atributos del entorno de ejecución de las rutas, como:

- Jornada (horario del viaje): Día para el horario de 6 am – 5:59pm o Noche para el horario de 6 pm – 5:59 am.
- DiferenciaEstimadaRealInicio: Diferencia entre la hora estimada de inicio del viaje en la ruta y la hora real de inicio.
- DiferenciaEstimadaRealLlegada: Diferencia entre la hora estimada de finalización del viaje en la ruta y la hora real de finalización.

- Cumplimiento: Llegada a destino con retraso o adelanto menor a 15 minutos.

A continuación, se usan tres algoritmos de minería de datos para el descubrimiento de patrones de comportamiento.

Para los tres algoritmos se usaron implementaciones de Microsoft ®

- Árboles de decisión (Microsoft *Decision Trees Algorithm*)
- Clusters (Microsoft *Clustering Algorithm*)
- Bayes (Microsoft *Naive Bayes Algorithm*)

La explicación de cada algoritmo se encuentra en la sección de definiciones (ver 2.9).

Para cada algoritmo se eligieron una variable clave, una variable predictiva y variables de entrada que en ocasiones se cambiaron de tipo de datos (e.g. las fechas se cambiaron de tipo date a long, pues así se pueden agilizar las consultas y hacer los cálculos más rápidos al trabajar con valores números y no con fechas; los atributos y sus tipos se describen en las tablas 4-3 y 4-4.

Tabla 4-3: Variables de los tres algoritmos de minería de datos.

Estructura	<i>Árboles de decisión</i>	<i>Clusters</i>	<i>Bayes</i>
	Microsoft_Decision_Trees	Microsoft_Clustering	Microsoft_Naive_Bayes
Código Ruta	Input	Input	Input
Cumplimiento	PredictOnly	PredictOnly	PredictOnly
Fecha Asignación	Input	Input	Omitir
Fecha Real Inicio	Input	Input	Omitir
Fecha Real Llegada	Input	Input	Omitir
Id Viaje	Key	Key	Key
Idcliente	Input	Input	Input
Jornada	Input	Input	Input
Placa	Input	Input	Input

Tabla 4-4: Variables, tipos y contenido.

Atributo	Tipo	Contenido
Código Ruta	Long	Discreto
Cumplimiento	Boolean	Discreto
Fecha Asignación	Long	Continuo
Fecha Real Inicio	Long	Continuo
Fecha Real Llegada	Long	Continuo
Id Viaje	Long	Discreto
Idcliente	Long	Discreto
Jornada	Text	Discreto
Placa	Text	Discreto

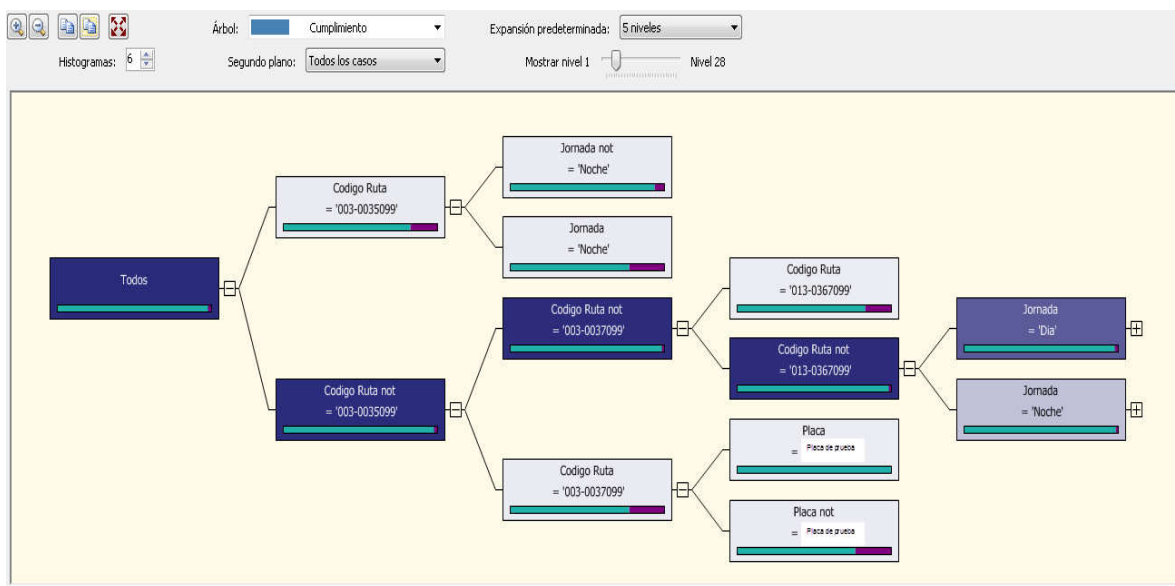
4.3.2.1 Caso de estudio – Algoritmos de minería de datos.

A continuación, se describen los resultados de los tres algoritmos usados para un ejemplo de las rutas ejecutadas y procesadas en una empresa de monitoreo de vehículos.

a. Árboles de decisión

Para el ejemplo se seleccionó un cliente, simulando el comportamiento para una sola empresa para identificar los factores que influyen en el cumplimiento de una ruta. Como resultado se generan árboles (ver figura 4-11) que indican los factores por niveles que influyen en la variable de decisión (cumple o no la ruta).

Figura 4-11: Árboles de decisión. (Elaboración propia)

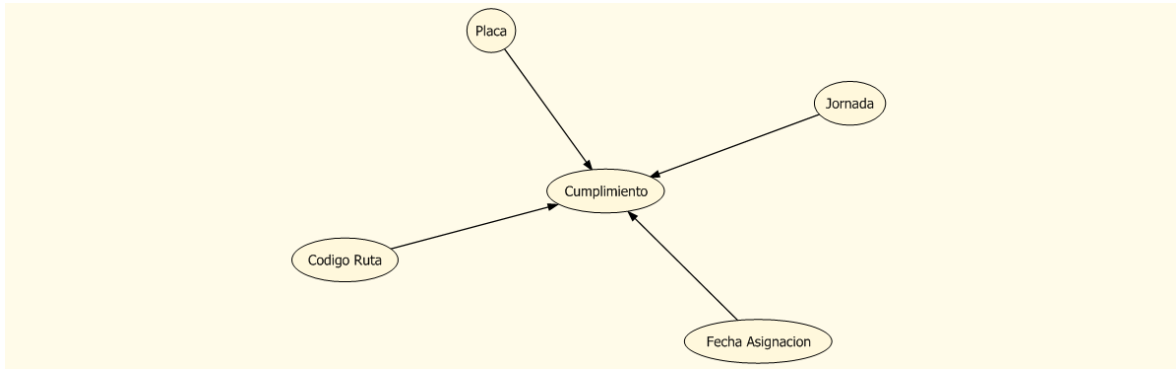


Se descubrió que los factores que más influyen de mayor a menor son:

- Ruta
- Jornada (Día o Noche)
- Placa
- Fecha Asignación

La organización de estos factores es conocida como red de dependencia (ver figura 4-12) e indica cuales son las variables de entrada más asociados con un cumplimiento de las rutas y que en el caso de los usuarios del modelo pueden ser fuente de información para tomar decisiones sobre las programaciones.

Figura 4-12: Red de dependencias del algoritmo de árboles de decisión



En la figura 4-13 se evidencia que, de un total de 62922 casos analizados en este algoritmo, para este caso de estudio, se puede observar una enorme cantidad de incumplimiento (97.39%) en las programaciones realizadas para los viajes de los vehículos y es gracias al modelo de minería de datos que se evidencian las variables que influyen en esto y que se mencionan en la red de dependencias.

Figura 4-13: Escenarios de cumplimiento para un 30% de muestra de los datos

Alta		Baja	
Escenarios totales: 62922			
Valor	Escenarios	Probabi...	Histograma
<input checked="" type="checkbox"/> Ausente	0	0,00%	
<input checked="" type="checkbox"/> False	61287	97,39%	
<input checked="" type="checkbox"/> True	1635	2,61%	

b. Clusters

Los algoritmos de *cluster* agrupan los casos de estudio de acuerdo con características similares y para determinar la probabilidad se resaltan los grupos que tienen mayor y menor porcentaje de no cumplimiento (ver figura 4-14 y figura 4-15).

Figura 4-14: Clúster de no cumplimiento.

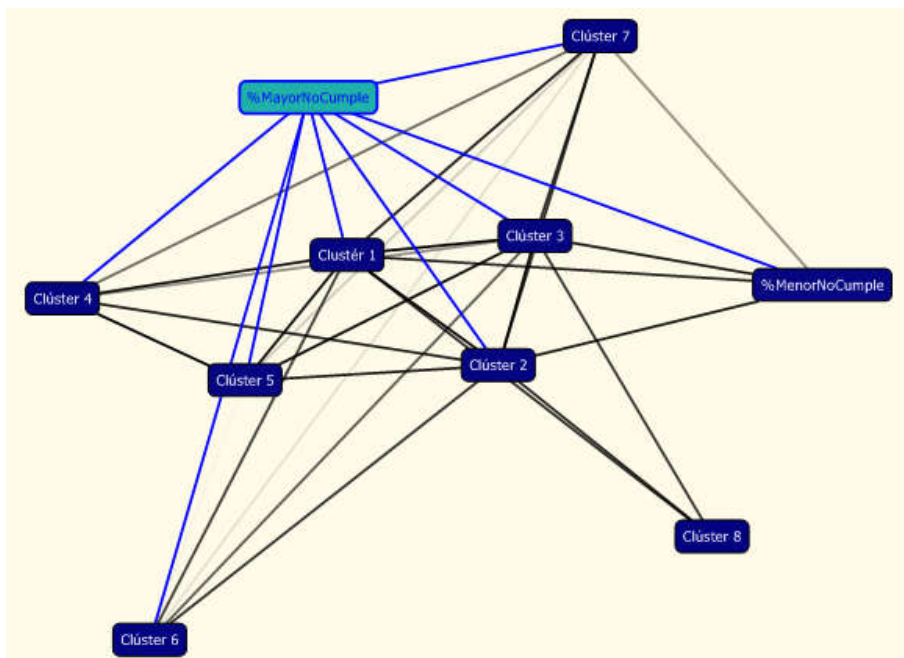
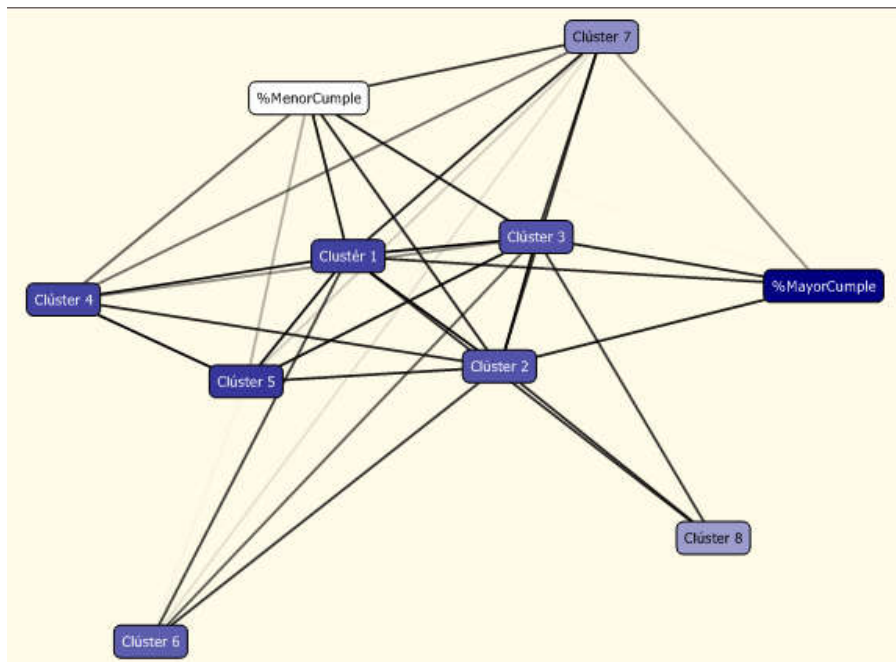


Figura 4-15: Comparativa de los grupos con mayor y menor porcentaje de incumplimiento.

Clúster 1: %MayorNoCumple		Clúster 2: %MenorNoCumple	
Puntuaciones de distinción para %MayorNoCumple y %MenorNoCumple			
Variables	Valores	Favorece %MayorNoCumple	Favorece %MenorNoCumple
Fecha Asignacion	20.160.124 - 20.160.123		
Fecha Asignacion	20.160.124 - 20.160.430		
Fecha Real Llegada	20.160.120 - 20.160.127		
Fecha Real Inicio	20.160.125 - 20.160.504		
Fecha Real Inicio	20.160.123 - 20.160.124		
Fecha Real Llegada	20.160.128 - 20.160.513		
Idcliente	22380		
Codigo Ruta	ausente		
Idcliente	13332		
Idcliente	11672		
Idcliente	11194		
Placa	ausente		
Jornada	Dia		
Jornada	Noche		
Idcliente	14474		
Codigo Ruta	R1		
Codigo Ruta	R3		
Codigo Ruta	R2		
Idcliente	7485		
Idcliente	5788		

En la figura 4-16 se muestra el complemento del grupo de incumplimiento, i.e. las variables que favorecen a la condición contraria (que se cumpla una ruta).

Figura 4-16: Clusters de cumplimiento.



En la tabla 4-5 se puede ver que el grupo de MenorCumplimiento equivale al grupo de MayorNoCumple y el de MayorCumplimiento al grupo de MenorNoCumple.

Tabla 4-5: Comparativa de porcentajes de cumplimiento y no cumplimiento

Clusters de cumplimiento	Porcentaje	Clusters de No cumplimiento	Porcentaje	Total
MenorCumple (Cumplimiento=1)	3%	MayorNoCumple (Cumplimiento=0)	97%	100%
MayorCumple (Cumplimiento=1)	97%	MenorNoCumple (Cumplimiento =0)	3%	100%

c. Algoritmo de Bayes.

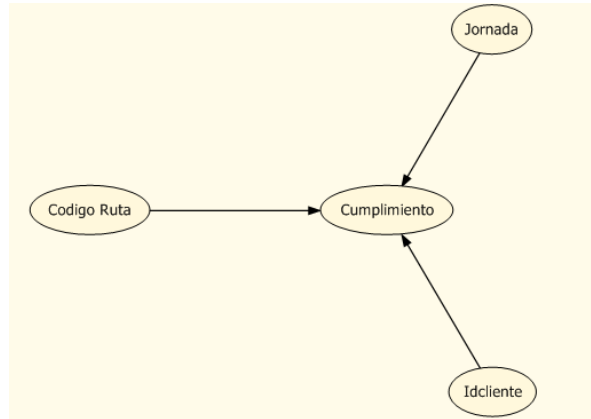
Este algoritmo es similar al anterior, pero no admite variables continuas de entrada por lo que no trabaja con las fechas de asignación, fecha real de inicio y fecha real de finalización de las rutas.

Con este algoritmo también se obtiene una red de dependencias que permite identificar las variables determinantes para el cumplimiento de una ruta.

Se descubrió que los factores que más influyen (ver figura 4-17) de mayor a menor son:

- Jornada (Día o Noche)
- Cliente
- Ruta

Figura 4-17: Red de dependencias del algoritmo de Bayes.



Este algoritmo también presenta un listado de los valores de los atributos que más influyen en el cumplimiento, de manera similar a los *clusters* se pueden identificar de mayor a menor las variables de favorecimiento, i.e. las variables que más se presentan en los casos que se analizaron para la variable de predicción, en el caso de la figura 4-18 cuando se presenta un cumplimiento=0 frente a las variables que favorecen los otros casos (cumplimiento =1).

Figura 4-18: Variables de influencia según el algoritmo de Bayes

Atributo: <input type="text" value="Cumplimiento"/>		Valor 1: <input type="text" value="False"/>	Valor 2: <input type="text" value="Todos los otros esta"/>
Puntuaciones de distinción para False y Todos los otros estados			
Atributos	Valores	Favorece False	Favorece Todos los otros ...
Codigo Ruta	R7		<div style="width: 100%;"></div>
Idcliente	22380		<div style="width: 80%;"></div>
Codigo Ruta	003-0035099		<div style="width: 70%;"></div>
Codigo Ruta	R1		<div style="width: 65%;"></div>
Codigo Ruta	003-0037099		<div style="width: 60%;"></div>
Codigo Ruta	206	<div style="width: 20%;"></div>	
Idcliente	7767	<div style="width: 15%;"></div>	
Codigo Ruta	090	<div style="width: 10%;"></div>	
Codigo Ruta	229	<div style="width: 10%;"></div>	
Idcliente	13332	<div style="width: 5%;"></div>	
Codigo Ruta	322		<div style="width: 5%;"></div>
Idcliente	7688	<div style="width: 5%;"></div>	
Codigo Ruta	101	<div style="width: 5%;"></div>	
Codigo Ruta	025	<div style="width: 5%;"></div>	
Idcliente	11672		<div style="width: 5%;"></div>
Idcliente	1203	<div style="width: 5%;"></div>	
Codigo Ruta	290		<div style="width: 5%;"></div>
Codigo Ruta	23	<div style="width: 5%;"></div>	
Jornada	Noche	<div style="width: 5%;"></div>	
Jornada	Dia		<div style="width: 5%;"></div>

Como se puede observar en este caso de estudio, la minería de datos es una herramienta valiosa para la toma de decisiones ya que permite descubrir variables y comportamiento de los datos que se pueden intervenir desde el gestor de la flota para “premiar” o “castigar” (calificación) el cumplimiento de la programación de los viajes, con la ventaja que arroja el modelo de uso de datos históricos de ejecución.

d. Modelo predictivo

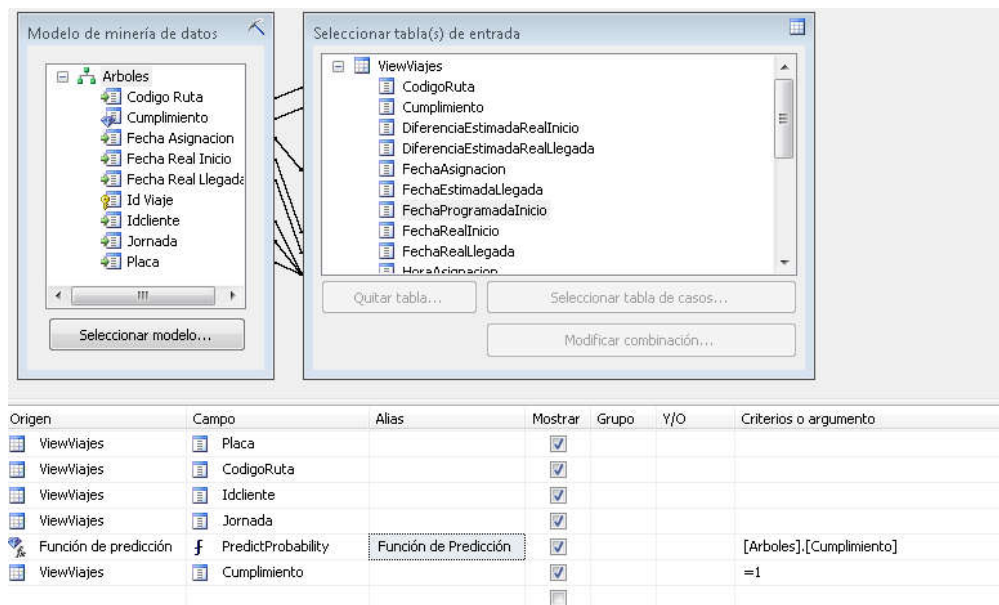
Por último, otra ventaja del modelo de minería de datos es la capacidad de predecir el comportamiento de la flota y del cumplimiento.

Por ejemplo, usando el algoritmo de árbol de decisión, se puede crear una tabla predictiva de cumplimiento.

En la figura 4-19 se muestra la relación de variables que se asignaron para la predicción de un cumplimiento de una ruta.

Se utiliza la función de predicción para el algoritmo de árboles de Microsoft y se pasa como parámetro de predicción el valor de la variable cumplimiento =1.

Figura 4-19: Modelo predictivo



En la tabla 4-6 se presentan los resultados de las predicciones de las placas, códigos de rutas, clientes y jornadas ordenadas por porcentaje mayor de cumplimiento.

Por ejemplo, para el modelo que se utilizó, con un porcentaje de 97.38% el viaje que mayor probabilidad de llegar a su destino en el tiempo programado, i.e. sin retrasos ni adelantos, será la ruta con código R1, del cliente 22380, durante un horario de inicio de ruta comprendido entre las 6 am – 5:59 pm y para una PlacaDemo1 ³

Tabla 4-6: Resultados de predicción para el algoritmo de árbol de decisiones.

Placa	CodigoRuta	Idcliente	Jornada	Función de Predicción	Cumplimiento
	R1	22380	Dia	0,97389494423083	1
	013-0706099	11672	Dia	0,97495168421952	1
	322	14474	Dia	0,97389494423083	1
	R2	22380	Dia	0,97389494423083	1
	235	14474	Dia	0,97389494423083	1
	RUTA ZOL FAC...	15266	Noche	0,97389494423083	1
	007-0289099	11672	Dia	0,97495168421952	1
	122	12778	Dia	0,97389494423083	1
	R1	22380	Dia	0,97389494423083	1
	3-35	11672	Noche	0,979875654079329	1
	028-0310099	11672	Dia	0,97495168421952	1
	783-13 Surtima...	11672	Dia	0,97495168421952	1
	R1	22380	Dia	0,97389494423083	1
	R7	22380	Dia	0,97389494423083	1
	R2	22380	Noche	0,97389494423083	1
	003-0037099	11672	Dia	0,759521355734226	1
	R4	22380	Noche	0,97389494423083	1
	R1	22380	Dia	0,97389494423083	1
	R1	22380	Noche	0,97389494423083	1
	784-13- Surtim...	11672	Dia	0,97495168421952	1
	R1	22380	Dia	0,97389494423083	1
	1	5788	Dia	0,97389494423083	1
	007-0388099	11672	Noche	0,979875654079329	1
	290	3772	Dia	0,97389494423083	1

La aplicación del modelo que se ha realizado en estos casos de estudio demuestran que sí se pueden encontrar datos fundamentales entre la ejecución histórica de las rutas y sí se puede establecer un modelo comparativo de programación y ejecución de rutas que esté acorde con lo que realmente sucede en los viajes de los vehículos de una flota de transporte y de esta manera usar alternativas al ruteo de vehículos actual.

³ Las placas han sido borradas o se han cambiado por políticas de uso de la información.

4.5 Validación del proceso con la propuesta de solución

Uno de los supuestos principales de este trabajo de investigación contempla que las decisiones sobre las rutas de los vehículos se toman de acuerdo a decisiones de los gestores de flota y se basan en su experiencia para tomar dichas ediciones, i.e. usan su intuición para determinar que rutas se le asignarán a un vehículo y hacen un monitoreo y una evaluación de las rutas posterior a la programación y ejecución de las mismas.

Para confirmar esta afirmación se hizo una serie de encuestas a los gestores de flota, gestores de seguridad, gestores operativos de varias empresas nacionales para determinar la forma en que se hace el proceso de creación, programación, monitoreo y evaluación de rutas.

Mediante el método Delphi se logra averiguar la opinión de expertos sobre la forma como se hacen los procesos actualmente y sobre si la propuesta de solución de esta investigación es válida para la toma de decisiones en la programación y monitoreo de sus rutas.

a. Primera encuesta

Los ítems principales de la primera encuesta son cualitativos y buscan mostrar la forma como los gestores de flota hacen la programación y monitoreo de vehículos en las rutas que asignan.

- Personas que respondieron el cuestionario: 24
- Número de preguntas por cuestionario: 8
- Número de respuestas totales: 192

Los resultados se presentan según la pregunta y el tema que se buscaban abordar:

- Uso de herramientas informáticas como apoyo en la creación de las rutas.

100% de los expertos informan el uso de alguna herramienta para este propósito, entre las cuales se mencionaron: Módulo de Control de Tráfico de la empresa Satrack, Módulo de Control Logístico de Tiempos de Satrack, Google Maps, Módulo de tiempos en región de Satrack, Trafico de Google, OpenStreet Maps.

- Formas de creación de rutas:
 - Creación manual de rutas.
 - Creación de rutas de acuerdo con eventos de monitoreo histórico. Se envía un vehículo desde un origen a un destino específico y se registra cada determinado tiempo la posición del vehículo, luego se genera un informe y se crea la ruta por donde pasó el vehículo.
 - Se procura generar rutas por zonas de baja congestión vehicular.
 - Información de experiencias del viaje según los conductores.
 - Validación de rutas que genera Google entre punto y punto.
 - De acuerdo con la experiencia y conocimiento del gestor de la flota.

- Métodos de asignación de rutas.
 - Por demanda y según una lista de vehículos disponibles dependiendo si es flota propia o de terceros.
 - Determinación de recursos disponibles (e.g. conductor, tamaño y tipo de la carga, horarios, entre otros).
 - Turnos y cargas fijas.
 - Vehículos más cercanos al origen de la ruta.

- Variables más importantes que ya se monitorean
 - Cumplimiento de rutas a tiempo.
 - Seguridad.
 - Tipos de carga por rutas y vehículos.
 - Conservación de la carga.
 - Velocidad.

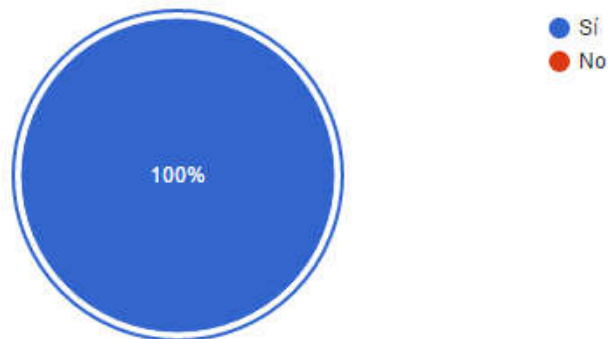
- Paradas en sitios no autorizados.
- Distancia recorrida.

- Variables que desearía que se investigaran.
 - Consumo de combustible.
 - Zonas seguras.
 - Apertura y cierre de puertas en zonas autorizadas.
 - Zonas de alto riesgo de accidentalidad.
 - Costos operativos de transporte.
 - Inclusión de tiempos de descanso y alimentación.
 - Hábitos de conducción.

- Calificación de las rutas.
 - Tiempo invertido en la ejecución de la ruta.
 - Mercancía en buen estado.
 - Velocidad y comportamiento según alarmas.
 - Novedades presentadas.

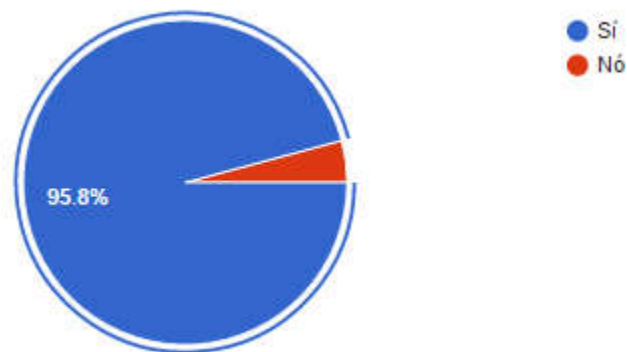
- Importancia de la diferencia entre el tiempo planeado y el ejecutado por el vehículo

Figura 4-20: Importancia de la diferencia entre el tiempo planeado y el que de verdad empleó el vehículo



- Importancia de tener mecanismos que permitan conocer la ejecución histórica de las rutas de sus vehículos para tener una base de comparación con las rutas programadas.

Figura 4-21: Importancia de tener mecanismos para conocer la ejecución histórica



b. Segunda encuesta

El método Delphi sugiere realizar una segunda ronda de preguntas con el fin de consolidar los criterios de los expertos.

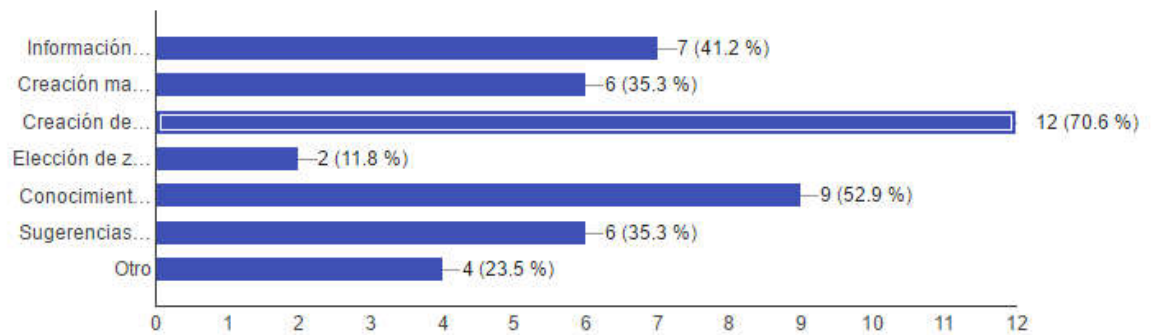
Los ítems principales de la segunda encuesta son cuantitativos y parte de los resultados de la primera encuesta sobre la forma como los gestores de flota hacen la programación y monitoreo de vehículos en las rutas que asignan.

- Personas que respondieron el cuestionario: 17
- Número de preguntas por cuestionario: 6
- Número de respuestas totales: 102

Los resultados se presentan según la pregunta y el tema que se quiere abordar:

1. ¿Cuáles de los siguientes métodos utiliza para crear las rutas?
 - i. Información de los conductores
 - ii. Creación manual de rutas
 - iii. Creación de rutas de acuerdo a eventos de monitoreo.
 - iv. Elección de zonas con menor congestión vehicular.
 - v. Conocimiento y experiencia.
 - vi. Sugerencias de herramientas como Google Maps u OpenStreetMap
 - vii. Otros: Reportes de frecuencia de viajes por rutas e información de estado de las vías de fuente oficial Twitter; Ruteadores, según el viaje contratado; Costo de peajes;

Figura 4-22: Métodos de creación de rutas.



Como se puede observar las formas de creación de rutas predominantes son:

- Creación basada en eventos de monitoreo (70.6 %)
- Conocimiento y experiencia (52.9%)
- Información de los conductores (41.2%)

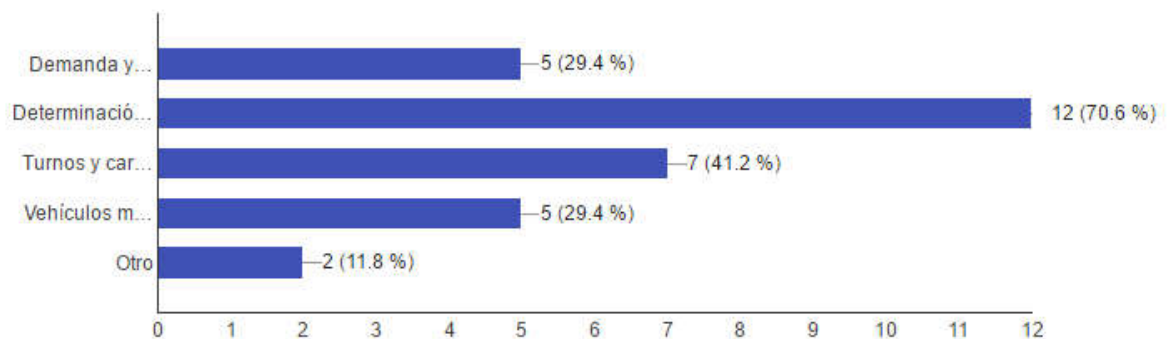
Esto indica que en la primera etapa del proceso que es del interés de esta tesis, la creación de una ruta, que comprende la determinación de los sitios de origen y destino y la región por la cual transitarán los vehículos depende de información AVL de los

vehículos que se hayan podido obtener; se realiza de manera empírica y se tiene en cuenta las sugerencias de los conductores sobre la ruta.

El modelo que se sugiere en esta tesis permite obtener datos de soporte para la creación de las rutas y cuya opción principal no es tenida en cuenta en los modelos exactos ni en los aproximados que se han desarrollado hasta ahora.

2. ¿De las siguientes opciones cuales son determinantes para la asignación de rutas?
- i. Demanda y una lista de vehículos para cubrirla.
 - ii. Determinación de recursos disponibles (e.g, conductor, tamaño y tipo de la carga, horarios, entre otros).
 - iii. Turnos y cargas fijas.
 - iv. Vehículos más cercanos al origen de la ruta
 - v. Otros: Flete y combustible;

Figura 4-23: Opciones determinantes en la asignación de rutas.



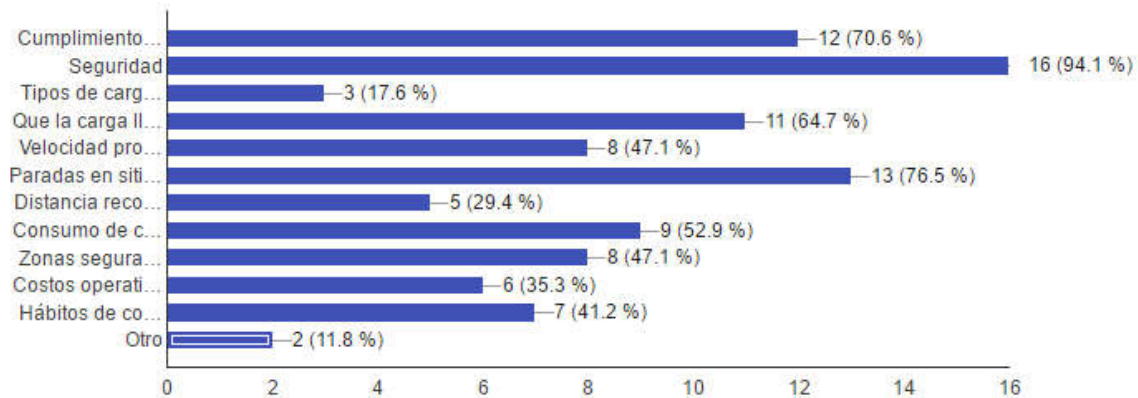
Las principales opciones que se tienen en cuenta a la hora de asignar rutas son:

- Determinación de recursos disponibles (e.g, conductor, tamaño y tipo de la carga, horarios, entre otros). (70.6%)
- Turnos y cargas fijas (41.2%)

El proceso de elegir los vehículos que son asignados a una ruta determinada en una programación, se puede ver enriquecido por el modelo propuesto en esta tesis pues permite conocer datos del conductor, del tamaño y tipo de la carga (*si se añade como parámetro al sistema*) y las jornadas de trabajo. Sin embargo también cabe aclarar que los modelos actuales de ruteo de vehículos también tienen en cuenta estas opciones para la asignación de rutas al igual que el modelo propuesto.

3. ¿Cuáles son las variables más importantes para usted en el monitoreo de los vehículos en las rutas?
 - i. Cumplimiento del tiempo en las rutas.
 - ii. Seguridad
 - iii. Tipos de carga por rutas y vehículos
 - iv. Que la carga llegue bien al destino.
 - v. Velocidad promedio de la ruta.
 - vi. Paradas en sitios no autorizados
 - vii. Distancia recorrida
 - viii. Consumo de combustible
 - ix. Zonas seguras y de baja accidentalidad.
 - x. Costos operativos de transporte
 - xi. Hábitos de conducción
 - xii. Otra.

Figura 4-24: Variables más importantes de monitoreo.



Las principales variables que son observadas en la ejecución de una ruta son:

- Seguridad (94.1%)
- Paradas en sitios no autorizados (76.5%)
- Cumplimiento del tiempo en las rutas (70.6%)

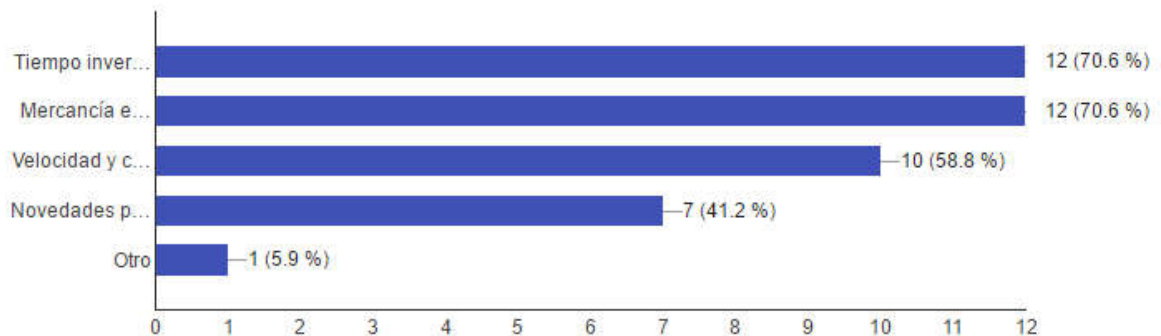
El modelo propuesto ayuda a entender las variables de influencia del cumplimiento de las rutas y tener información previa de las diferencias históricas que se dieron entre lo programado y ejecutado, para medir el cumplimiento.

El número de paradas en sitios no autorizados y las variables asociadas a la seguridad, por ejemplo, determinar número de accidentes o casos de hurto dentro de las rutas es parte del trabajo futuro de estas tesis.

4. ¿Variables que Influyen en la calificación de un viaje realizado?

- Tiempo invertido en la ejecución de la ruta
- Mercancía en buen estado
- Velocidad y comportamiento bajo en alarmas
- Novedades presentadas
- Otras.

Figura 4-25: Variables de influencia en la calificación de rutas.



Los gestores de flota en sus análisis de la ruta califican según:

- Tiempo invertido en la ejecución de la ruta (70.6%)
- Mercancía en buen estado (70.6%)
- Velocidad y comportamiento bajo en alarmas (58.8%)

Esta tesis presenta un modelo que permite conocer históricamente el tiempo invertido en la ejecución de las rutas y de esta manera atender una de las principales variables que determinan la calificación de una ruta.

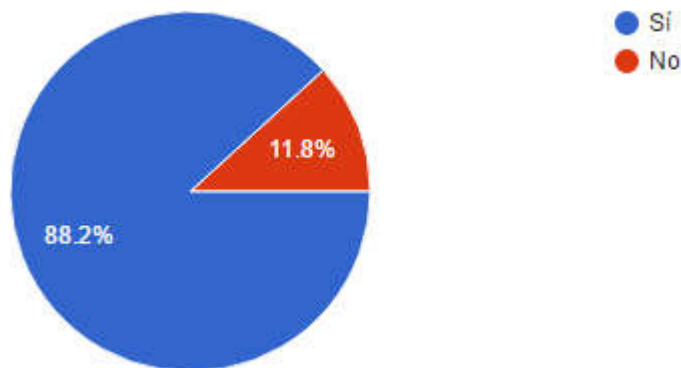
La inclusión al modelo de la velocidad promedio y el número de alarmas que se presenten en rutas son parte del trabajo futuro de esta tesis.

Cabe señalar que los modelos matemáticos exactos y los métodos aproximados permiten conocer el tiempo que debe ejecutar un vehículo en el recorrido de una ruta, sin embargo no tienen en consideración lo que previamente se ha ejecutado en esas mismas rutas

desligándose de otras características que influyen en el cumplimiento de una ruta, aspecto diferenciador entre la propuestas de esta tesis y los métodos previos.

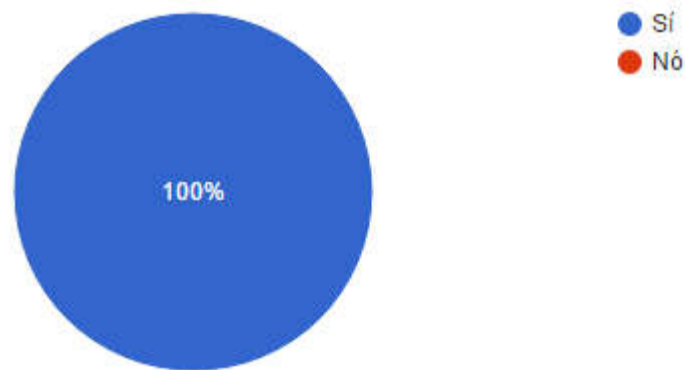
5. ¿Es importante para usted la diferencia entre el tiempo planeado y el que de verdad empleó el vehículo?

Figura 4-26: Importancia de la diferencia entre planeado y ejecutado.



Para el 88.2% de los expertos es de importancia poder calcular las diferencias entre el tiempo planeado o programado para las rutas y el tiempo de ejecución de las mismas, valor incluido en el modelo de esta tesis.

6. ¿Es importante tener mecanismos que le permita conocer la ejecución histórica de las rutas de sus vehículos para tener una base de comparación con las rutas programadas?



El 100% de los expertos está de acuerdo en lo fundamental que es conocer los datos históricos para hacer comparaciones con las rutas programadas.

Este indicador permite que el modelo propuesto sea válido para el proceso de ruteo de vehículos y la comparación entre ejecuciones históricas y ejecuciones actuales.

4.6 Comparación del modelo con soluciones actuales.

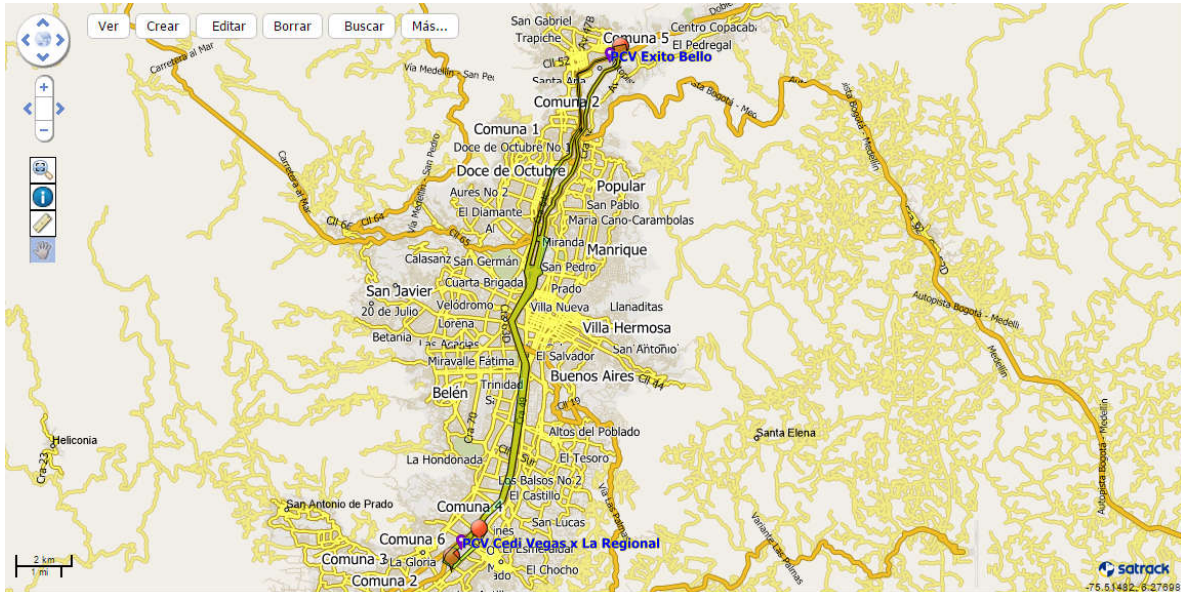
Como mecanismo de validación se presenta otro caso de estudio en el que se analiza una ruta creada por un gestor de flota y se compara con la sugerida por el servidor de direcciones de Google Maps ®.

Posteriormente se analiza mediante el modelo propuesto en esta tesis los promedios de viajes para dicha ruta en el último año.

Como resultado se descubre que hay diferencias entre lo ejecutado y lo programado.

En este caso se toma como referencia la ruta 003-0030099 de un cliente de la empresa Satrack, esta ruta se puede apreciar en la figura 4-27.

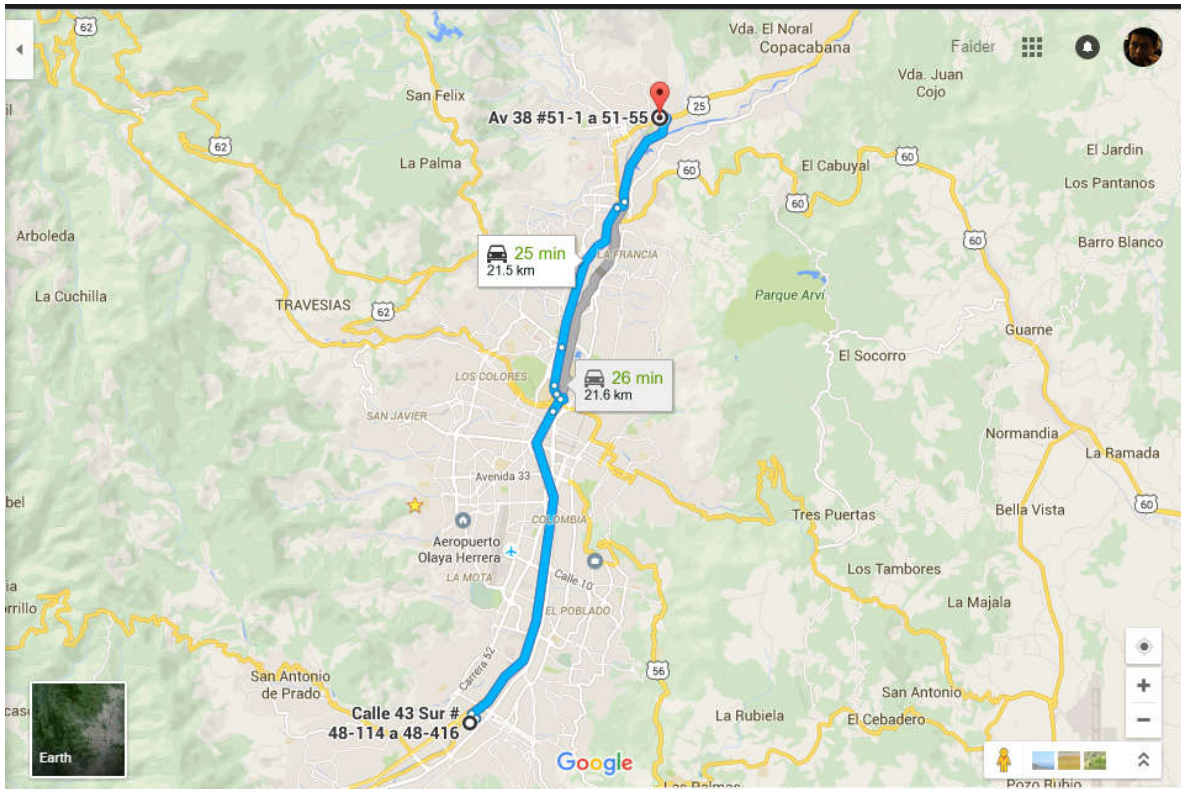
Figura 4-27: Ruta 003-0030099



El cliente establece en **50 minutos** la duración total de la ruta basado en la experiencia del gestor de la flota. (un experto de la empresa dueña de la flota de esta empresa hizo parte de las encuestas de validación).

Por otro lado, la sugerencia de Google Maps para la duración de este trayecto es de **25 minutos** en su ruta más corta y **26 minutos** en una de sus rutas alternativas. [Distancia entre los puntos con coordenadas: 6.170636, -75.598326 y 6.340657, -75.545377] (Ver figura 4-28)

Figura 4-28: Rutas sugeridas por Google Maps



Luego de procesar los viajes realizados en el último año utilizando el modelo propuesto como parte del sistema de soporte a la decisión y compararlos con las dos aproximaciones anteriores (cliente y Google Maps) se obtienen los datos de las tablas 4-7 y 4-8.

Tabla 4-7: Comparativa del modelo con las propuestas del cliente y Google Maps

Duración de ruta según cliente: 50 minutos			
Duración de ruta sugerida por Google Maps: 25 minutos			
Placa	Duración promedio según el modelo	Diferencia duración promedio vs sugerida Google Maps	Diferencia duración promedio vs cliente
Placademo3	50	25	0
Placademo4	41	16	-9
Placademo5	41	16	-9
Placademo6	24	-1	-26
Placademo7	139	114	89
Placademo8	23	-2	-27
Placademo9	38	13	-12
Placademo10	32	7	-18
Placademo11	21	-4	-29
Placademo12	28	3	-22
Placademo13	27	2	-23
Placademo14	33	8	-17
Placademo15	27	2	-23
Placademo16	52	27	2
Placademo17	52	27	2
Placademo18	67	42	17
Placademo19	57	32	7
Placademo20	24	-1	-26
Placademo21	228	203	178
Placademo22	93	68	43
Placademo23	32	7	-18
Placademo24	278	253	228
Placademo25	406	381	356
Placademo26	54	29	4

Placademo27	44	19	-6
Placademo28	40	15	-10
Placademo29	37	12	-13
Placademo30	28	3	-22
Placademo31	29	4	-21
Placademo32	35	10	-15
Placademo33	26	1	-24
Placademo34	29	4	-21
Placademo35	39	14	-11
Placademo36	44	19	-6
Placademo37	44	19	-6
Placademo38	33	8	-17
Placademo39	132	107	82
Placademo40	30	5	-20
Placademo41	50	25	0
Placademo42	235	210	185
Placademo43	29	4	-21
Placademo44	57	32	7
Placademo45	41	16	-9
Placademo46	181	156	131
Placademo47	30	5	-20
Placademo48	28	3	-22
Placademo49	26	1	-24
Placademo50	38	13	-12
Placademo51	29	4	-21

Tabla 4-8. Promedios de duración

Promedio de la duración según el modelo de las placas seleccionadas.	65,32653061
Promedio de las diferencias de duración del cliente vs sugerida por Google Maps	40,32653061
Promedio de las diferencias de duración vs cliente de las diferencias entre el modelo y el cliente	15,3265306

Como se puede observar en la tabla 4-8 la duración encontrada en el modelo presenta una diferencia con la propuesta por Google Maps en un promedio de 40.32 minutos, mientras que con la diferencia con la propuesta del cliente es de 15.32 minutos.

Las diferencias se pueden explicar porque el modelo parte de hechos históricos reales que han reportado los vehículos en la ejecución de las rutas.

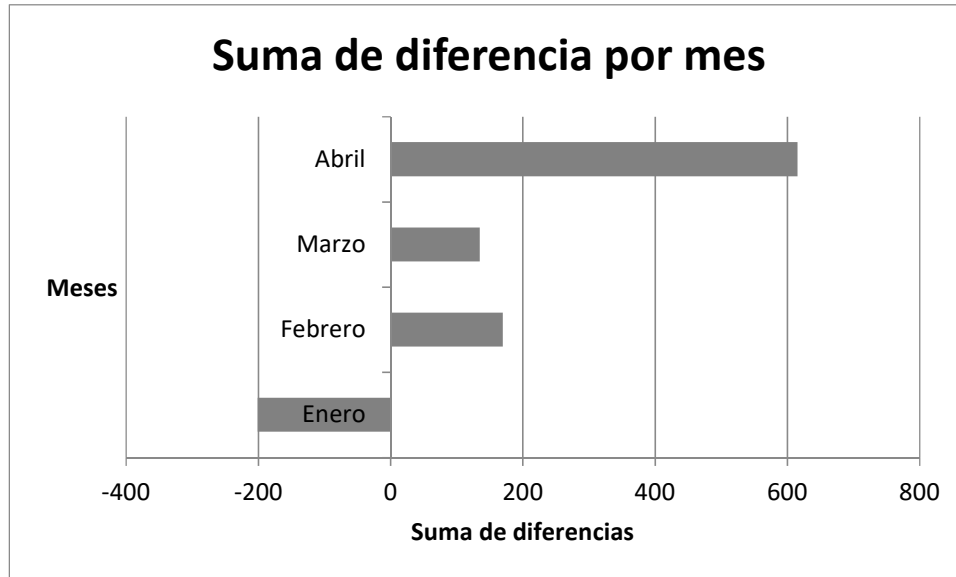
Otra ventaja del modelo está en la posibilidad de presentar los datos de diferencia para las rutas de manera agrupada o desglosada según se desee para algunas de las dimensiones del modelo y además permite la inclusión de nuevas dimensiones o variables de decisión para el análisis de los impactos en las rutas.

En la tabla 4-9 y figura 4-29 se muestra otra funcionalidad, que consiste en conocer la suma total de diferencias de los viajes por unidad de tiempo, en este caso para 4 meses del año 2016.

Tabla 4-9: Suma de diferencias por mes.

Ruta	2016		
003-0030099	Diferencias	Viajes	Suma de diferencia
Enero	-21905	109	-200,9633028
Febrero	32574	192	169,65625
Marzo	26361	195	135,1846154
Abril	73876	120	615,6333333
Total general	110906	616	180,0422078

Figura 4-29: Suma de diferencias por mes de la ejecución frente a la programación



Se han presentan dos indicadores, la suma de diferencias, para representar un total de tiempos de desfase con respecto a lo planeado, que pueden servir a un gestor de flota para determinar cuánto tiempo se está ganando o perdiendo en la operación total de un conjunto de vehículos, sin embargo, el segundo indicador tiene como ventaja que permite asignar un punto de referencia por vehículo en comparación con toda la flota e ir construyendo comparativos más detallados del comportamiento en la ejecución de una ruta para un vehículo en particular.

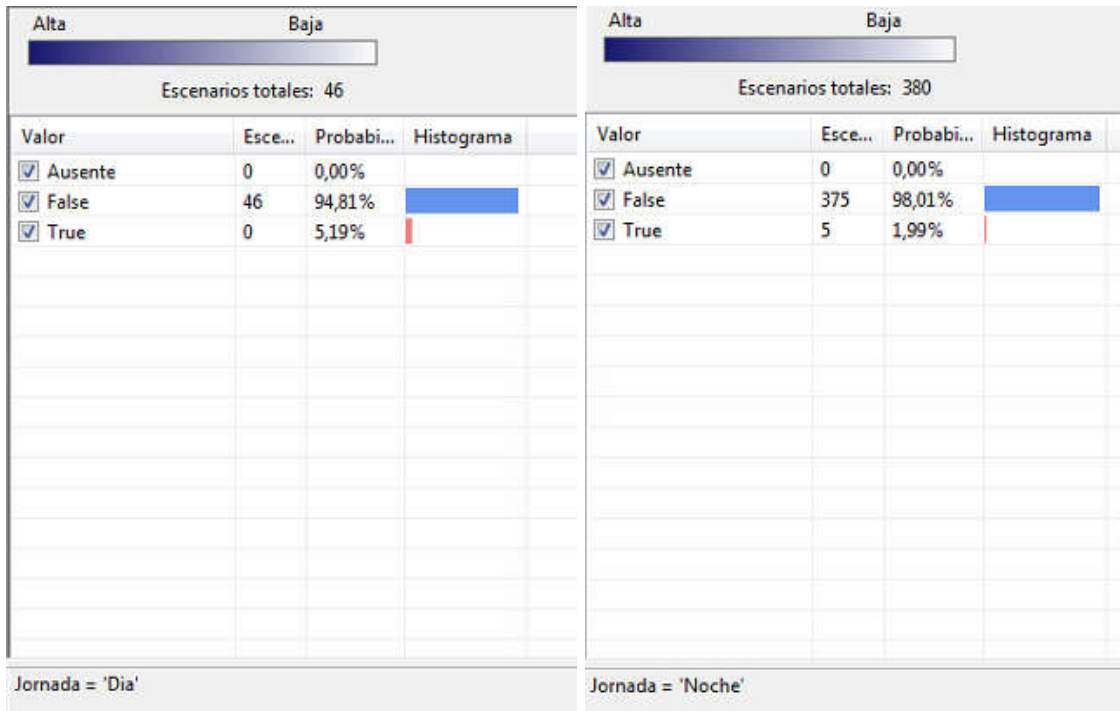
Minería de datos

Otra ventaja del modelo propuesto y que lo diferencia de los métodos de solución actuales es la incorporación de minería de datos para el descubrimiento de patrones en el comportamiento de la ejecución de rutas.

Para el caso particular que se está validando, se puede descubrir las probabilidades de cumplimiento que se tienen por cada jornada, lo que da una oportunidad para tomar decisiones sobre la jornada de trabajo, ya que para este caso en particular es la variable de mayor dependencia para el cumplimiento o no de la ruta.

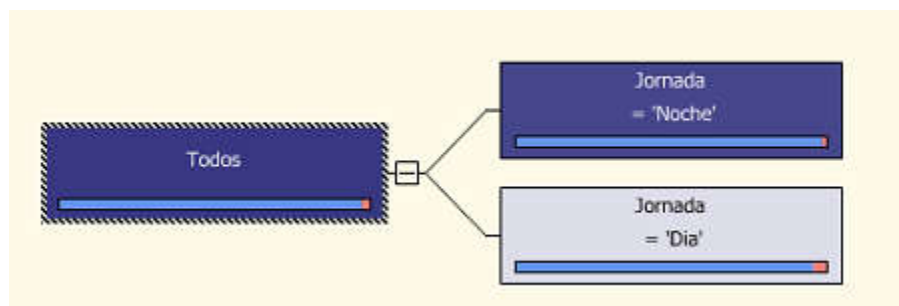
En las figuras 4-30 se muestran los porcentajes y la probabilidad que favorece a los viajes diurnos (5.19%) frente a los nocturnos (1.99%) para que se cumpla la ruta de acuerdo a lo planeado, según un algoritmo de árbol de decisión.

Figura 4-30: Probabilidades de cumplimiento.



En la figura 4-31 se observa la probabilidad de cumplimiento por jornada según un algoritmo de árbol de decisión para el ejemplo de una ruta. Demostrando que la probabilidad de cumplimiento en la ejecución de viajes en particular sobre esa ruta es mayor en jornada de la noche. No se especifica porque se da este comportamiento, pero es un punto de partida para analizar la asignación de rutas por jornadas.

Figura 4-31: Algoritmo de árboles de decisión para el caso particular de la ruta 003-0030099



5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 Conclusiones

Los métodos actuales que son analizados en esta tesis son efectivos para resolver los problemas de ruteo de vehículos, sin embargo, se pueden generar alternativas de solución que permitan comparar las programaciones de los vehículos con su ejecución real, siempre y cuando se tengan registros históricos de monitoreo.

Las actividades de las empresas de transporte para la creación y asignación de rutas son procesos que requieren buena planificación y que deben estar soportados sobre el conocimiento que se puede obtener de datos históricos de los viajes programados y de la manera como los vehículos los han ejecutado.

Los principales objetivos de las empresas de monitoreo de vehículos son:

- Reducir costos de transporte
- Reducir tiempos de entrega de mercancía
- Acotar distancias recorridas
- Mejorar el servicio
- Aprovechar de una manera óptima los recursos
- Realizar una logística de flota más eficiente

El modelo propuesto se puede comparar con los métodos de programación de rutas actuales y se muestra que es válido como una forma de programar teniendo en cuenta la ejecución previa de los viajes y permite incluir en la toma de decisiones sobre los vehículos, los eventos históricos de ejecución de los viajes para tener un panorama más acorde con el comportamiento real de la flota.

Algunas de las características de un monitoreo dinámico a priori, como el propuesto en esta tesis son:

- Registros de los mejores recorridos en términos del tiempo.
- Enrutamiento de vehículos con rutas iguales o similares, en términos de tiempo.
- Monitoreo de trayectorias de acuerdo a las rutas planeadas frente a las ejecutadas en tiempo real.

Otra ventaja del modelo para el sistema de soporte a la decisión (DSS) propuesto es poder generar mecanismos de análisis de datos que a través de la minería de datos se pueda encontrar patrones de comportamiento en la ejecución de la ruta y darles a las empresas de transporte una forma de predecir y programar las rutas de una forma más eficiente.

Aunque existen herramientas informáticas como es el caso de *Google Maps*, *Waze* u otros que recolectan y proponen rutas con datos históricos; una de las principales ventajas del modelo es tener una fuente de datos diferente a los múltiples casos de viajes de otros vehículos, sino la individualización de los datos históricos, para no caer en el problema de sugerir rutas y tiempos basados en información de otros vehículos sino más bien que la fuente de datos sean los datos históricos del propio vehículo que realizará la ejecución de las rutas.

Por ultimo cabe mencionar que el modelo tiene algunas deficiencias comparado con algunas técnicas de ruteo de vehículos actuales debido a que para mostrar la información sobre las rutas se tiene que tener datos históricos de ejecución, pues es el insumo necesario y principal para el modelo, esto hace que sea ineficiente para brindar información de rutas totalmente nuevas.

5.2 Trabajo Futuro

El modelo propuesto está diseñado para rutas de un solo origen y un solo destino, variando las condiciones de acuerdo a la región ruta que se elija, sin embargo, a futuro se pueden realizar modificaciones al modelo para que pueda consultar datos dinámicos como los de rutas secundarias donde se conoce el origen, pero los vehículos pueden transitar por muchas regiones rutas y normalmente son utilizados en transporte urbano o cuando se tienen múltiples destinos.

Por otra parte, en la propuesta de esta tesis se realizan cálculos de las diferencias entre tiempos y la manera como se obtienen los datos permite la inclusión de otras variables.

Sin embargo, un trabajo pendiente es utilizar dichas variables, como las distancias, la velocidad, la seguridad en la vía, el consumo de combustible, los costos operacionales, entre otros, para incluirlas en el análisis.

Como previamente se había mencionado, se puede trabajar para incluir el número de paradas en sitios no autorizados y las variables asociadas a la seguridad, por ejemplo, determinar número de accidentes o casos de hurto dentro de las rutas es parte del trabajo futuro de estas tesis

Las rutas analizadas son estáticas en términos de origen, destino y región ruta, i.e. su estructura no cambia durante una ejecución, por otro lado, que lo que cambia dinámicamente son las asignaciones de los vehículos. Se puede pensar en modificar el modelo para aceptar la comparación de rutas distintas o de brindar información global a un conjunto de clientes basado en lo que realicen otros, pero que a diferencia de otras herramientas existentes se haga basado en criterios de similitud adecuados al tipo de vehículo, tipo de ruta, condiciones del ambiente, horario y fechas de programación, entre otros; para que la comparación sea mucho más acorde con lo real.

Cuando no existen datos históricos de las rutas es posible que se tenga un problema para el modelo, se puede pensar en las formas como alimentar el modelo cuando el caso se trate de vehículos o conductores nuevos, con datos simulados, para ofrecer alternativas a los casos sin registros anteriores.

Referencias bibliográficas

- Aguiar, A., Nunes, F., Silva, M., & Elias, D. (2009). Personal Navigator for a Public Transport System using RFID Ticketing. *Mobility and Transportation*, 1–6.
- Applegate, D. L., Bixby, R. E., Chvátal, V., & Cook, W. J. (2007). The Traveling Salesman Problem: A Computational Study. *Operations Research*, 608. Retrieved from <http://press.princeton.edu/titles/8451.html>
- Baldacci, R., & Mingozzi, A. (2009). A unified exact method for solving different classes of vehicle routing problems. *Mathematical Programming*, 120(2), 347–380. <https://doi.org/10.1007/s10107-008-0218-9>
- Baldacci, R., Mingozzi, A., & Roberti, R. (2012). Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints. *European Journal of Operational Research*, 218(1), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.07.037>
- Baldacci, R., Toth, P., & Vigo, D. (2007). Recent advances in vehicle routing exact algorithms. *4OR A Quarterly Journal of Operations Research*, 5(4), 269–298. <https://doi.org/10.1007/s10288-007-0063-3>
- Bilal, S. M., Bernardos, C. J., & Guerrero, C. (2013). Position-based routing in vehicular networks: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 36(2), 685–697. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2012.12.023>
- Cáceres Cruz, J. D. J. (2013). Randomized Algorithms for Rich Vehicle Routing Problems : From a Specialized Approach to a Generic Methodology, (July), 299.
- Cano P, V. H. (2011). Aplicación de los SIG para la generación de rutas de evacuación en caso de desastres , como ayuda para la planificación urbana : “ caso costa oriental del Lago de Maracaibo “, 26, 17–26.
- Capterra. (2015). Top Fleet Management Software. Retrieved from <http://www.capterra.com/fleet-management-software/#infographic>
- Centro de investigación de las telecomunicaciones (CINTEL). (2010). *Estudio Cualitativo: ITS -Intelligent Transportation Systems en Colombia. Interac TIC: Centro de*

Investigación de las comunicaciones.

- Contardo Vera, C. A. (2005). Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas Formulación Y Solución De Un Problema De Ruteo De Vehículos Con Demanda Variable En Tiempo Real , Traspuestos Y Ventanas De Tiempo.
- Correa Espinal, A., Cogollo Flórez, J., & Salazar López, J. (2011). Solución de problemas de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad usando la teoría de grafos, *8*(3), 27–32.
- Cortés Puchades, V., Mula Bru, J., & Rodríguez Villalobos, A. (2008). An application of Graph Theory to improve the planning of work routes for a company in the vending sector. *Revista de Métodos Cuantitativos Para La Economía Y La Empresa*, (6), 7–22.
- Dalkey, N. C., & Helmer, O. (1963). An experimental application of the Delphi method to the use of experts. *Management Science*, *9*(3), 458–467.
<https://doi.org/10.1287/mnsc.9.3.458>
- Dantzing, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, *6*(1), 80–91. <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>
- Daza, J. M., Montoya, J. R., & Narducci, F. (2009). Resolución de problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico de dos fases. *Eia*, *1*(12), 23–38.
- De Jaegere, N., Defraeye, M., & Van Nieuwenhuysse, I. (2014). The vehicle routing problem: state of the art classification and review. *FEB Research Report KBI_1415*. Retrieved from <https://lirias.kuleuven.be/handle/123456789/457452>
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connection with graphs. *Numerische Mathematik*, *1*(1), 269–271. <https://doi.org/10.1007/BF01386390>
- Du, L., Han, L., & Li, X. Y. (2014). Distributed coordinated in-vehicle online routing using mixed-strategy congestion game. *Transportation Research Part B: Methodological*, *67*, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.05.003>
- Duarte Alleuy, B. E. (2009). *Heurística basada en generación de columnas para el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y flota homogénea caso: Cervecerías Chile s.a.*

- Ebensperger Palacios, M. J. (2009). Una formulación para el problema de ruteo de vehículos con tiempos de viaje dependientes del tiempo para la actualización de rutas con información en tiempo real.
- French, S. (2010). Decision support systems. *Decision Support Systems*, 50(3), 1539–1548. [https://doi.org/10.1016/S0167-9236\(99\)00030-5](https://doi.org/10.1016/S0167-9236(99)00030-5)
- Galván, S., Arias, J., & Lamos, H. (2013). Optimización por simulación basado en EPSO para el problema de ruteo de vehículos con demandas estocásticas. *Dyna*, (179), 60–69.
- García, A. V. (2012). Algoritmo genético para el problema aprovechando las capacidades de GEOQ del agente viajero Genetic algorithm for the traveling salesman problem using the capabilities of GEOQ, 5(8).
- Gartner. (2016). IT Glossary. Retrieved from <http://www.gartner.com/it-glossary/>
- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers and Operations Research*, 13(5), 533–549. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(86\)90048-1](https://doi.org/10.1016/0305-0548(86)90048-1)
- Granbohm, H., & Wiklund, J. (1999). GPRS - general packet radio service. *Ericsson Review (English Edition)*, 76(2), 82–88. <https://doi.org/10.1109/ICUPC.1995.497087>
- Gutiérrez, V., Palacio, J. D., & Villegas, J. G. (2007). Reseña del software disponible en Colombia para el diseño de rutas de distribución y servicio. *Revista Universidad EAFIT*, 43(145), 60–80. Retrieved from <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/781/688>
- Hartl, R. F., Hasle, G., & Janssens, G. K. (2006). Special issue on Rich Vehicle Routing Problems. *Central European Journal of Operations Research*, 14(2), 103–104. <https://doi.org/10.1007/s10100-006-0162-9>
- Hermosilla, A., & Barán, B. (2004). Comparación de un sistema de colonias de hormigas y una estrategia evolutiva para un problema multiobjetivo de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo. *30ma Conferencia Latinoamericana de Informática (CLEI2004)*, 379–388.
- Isaza, S. N. (2012). Desarrollo y Codificación de un Modelo Matemático para la

Optimización de un Problema de Ruteo de Vehículos con Múltiples Depósitos.

- Kao, M., & Wang, E. M. (2013). Proceedings of 2012 3rd International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation (IEMI2012), 451–459.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-33012-4>
- Karimi, H. a., Peachavanish, R., & Peng, J. (2004). Finding Optimal Bus Service Routes: Internet-Based Methodology to Serve Transit Patrons. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 18(2), 83–91. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2004\)18:2\(83\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2004)18:2(83))
- Keen, P. G. W. (1980). Decision support systems: a research perspective. *Decision Support Systems: Issues and Challenges: Proceedings of an International Task Force Meeting*, 23–44. Retrieved from <http://18.7.29.232/handle/1721.1/47172>
- Krumke, S. O. (2001). Online Optimization Competitive Analysis and Beyond.
- Laguna, L. (2008). GMOR : Google Maps para la Optimización de Rutas.
- Lahyani, R., Khemakhem, M., & Semet, F. (2015). Rich vehicle routing problems: From a taxonomy to a definition. *European Journal of Operational Research*, 241(1), 1–14.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.048>
- Liao, T.-Y., & Hu, T.-Y. (2011). An object-oriented evaluation framework for dynamic vehicle routing problems under real-time information. *Expert Systems with Applications*, 38(10), 12548–12558. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.041>
- López Castro, L. F. (2011). *Diseño de método de solución basado en un algoritmo genético híbrido al problema multiobjetivo de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo difusas.*
- López Pérez, J. F., & Badii, M. (2004). Análisis comparativo de una metaheurística en base a algoritmo genético vs un método de ramificación y corte para un caso de entrega y recolección con restricciones de ventana de horario (Comparative analysis of a metaheuristic based on a genetic algorit. *InnOvacíOnes de NegOciOs*, 1(2), 229–243.
- López Pérez, J. F., & Badii, M. (2005). Algoritmo genético para un problema de ruteo con entrega y recolección de producto y con restricciones de ventana de horario. *CIENCIA UANL*, VIII(2).

- Lüer, A., Benavente, M., Bustos, J., & Venegas, B. (2009). El problema de rutas de vehículos: Extensiones y métodos de resolución estado del arte. *CEUR Workshop Proceedings*, 558.
- Marakas, George, M. (1998). *Decision Support Systems In the 21st Century*.
- Martínez Quijano, A. (2010). Un algoritmo distribuido de Ruin & Recreate para el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo, 1–36.
- McNeff, J. G. (2002). The global positioning system. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50(3), 645–652. <https://doi.org/10.1109/22.989949>
- Microsoft. (n.d.). Algoritmos de minería de datos (Analysis Services: Minería de datos).
- Microsoft. (2016a). Microsoft Decision Trees Algorithm.
- Microsoft. (2016b). Microsoft Naive Bayes Algorithm.
- Microsoft. (2016c). Microsoft Sequence Clustering Algorithm.
- Moreno, F. J. (2013). Las Bodegas de Datos (Data warehouses) [diapositivas de PowerPoint] Recuperado de: Curso de Topics Avanzados en bases de datos.
- Olivera, A. (2004). Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos. *White Paper, Uruguay*.
- Olivera, A. (2005). Memorias adaptativas para el problema de ruteo de vehículos con múltiples viajes.
- Papinski, D., & Scott, D. M. (2011). A GIS-based toolkit for route choice analysis. *Journal of Transport Geography*, 19(3), 434–442. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2010.09.009>
- Pellegrini, P. (2005). Université Libre de Bruxelles Application of Two Nearest Neighbor Approaches to a Rich Vehicle Routing Problem. *October*, (October).
- Perosio, L. L., & Zunino, C. H. (2008). Un Algoritmo Tabu Search Granular para el Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo y Entregas Parciales, 83.
- Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C., & Medaglia, A. L. (2011). A Review of Dynamic Vehicle Routing Problems, 0–28.
- Pillac, V., Guéret, C., Medaglia, a., & Others. (2011). Dynamic Vehicle Routing Problems:

- State Of The Art and Prospects. Retrieved from http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00623474/%5Cnhttp://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/62/34/74/PDF/Pillac2010_-_Dynamic_vehicle_routing_problems_-_state_of_the_art_and_prospects.pdf
- Pirabán, A. J. (2008). Problema de Enrutamiento de Vehículos. Retrieved from http://adingor.es/congresos/web/uploads/cio/cio2011/metodos_cuantitativos/847-856.pdf
- Pirabán, J. (2008). Métodos Aproximados para la Solución del Problema de Enrutamiento de Vehículos, (Dic), 1–10.
- Prodhon, C., & Prins, C. (2014). A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.01.005>
- Psaraftis, H. N. (1988). Dynamic Vehicle Routing Problems. <https://doi.org/10.1002/9780470400531.eorms0278>
- Qi, M., Ding, G., Zhou, Y., & Miao, L. (2011). Vehicle Routing Problem with Time Windows Based on Spatiotemporal Distance. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 11(1), 85–89. [https://doi.org/10.1016/S1570-6672\(10\)60104-3](https://doi.org/10.1016/S1570-6672(10)60104-3)
- Quintero, J. A. (2005). Modelo de optimización para vehículos de transporte público colectivo urbano.
- Reinhardt, C. (2005). Taxi Cab Geometry: History and Applications. *Editorial: Social Justice, Taxicabs and Soap-Operatic ...*, 2(1), 38–64. Retrieved from http://www.infoagepub.com/products/journals/TMME/vol2no1_2005.pdf#page=40
- Reyes, L. C., Orta, J. F. D., Barbosa, J. J. G., Jimenez, J. T., Huacuja, H. J. F., & Cruz, B. A. A. (2008). An ant colony system algorithm to solve routing problems applied to the delivery of bottled products. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (Vol. 4994 LNAI, pp. 329–338). https://doi.org/10.1007/978-3-540-68123-6_36
- Rieck, J., & Zimmermann, J. (2010). A new mixed integer linear model for a rich vehicle routing problem with docking constraints. *Annals of Operations Research*, 181(1), 337–358. <https://doi.org/10.1007/s10479-010-0748-4>

- Ritzinger, U., Puchinger, J., & Hartl, R. F. (2014). Dynamic programming based metaheuristics for the dial-a-ride problem. *Annals of Operations Research*.
<https://doi.org/10.1007/s10479-014-1605-7>
- Rojas Mejías, J. A. (2012). Heurística basada en covering y generación de columnas dinámico para el problema de ruteo dinámico de vehículos con ventanas de tiempo.
- Romero, P. E. Z. (2005). Cálculo de rutas óptimas mediante sig en el territorio de la ciudad celtibérica de segeda. *propuesta metodológica*, 95–111.
- Satrack Inc de Colombia. (2015). Unidades Satrack.
- Skulmoski, G. J., & Hartman, F. T. (2007). The Delphi Method for Graduate Research. *Journal of Information Technology Education*, 6(1), 1–21.
<https://doi.org/10.1.1.151.8144>
- Slater, A. (2002). Specification for a dynamic vehicle routing and scheduling system. *International Journal of Transport Management*, 1(1), 29–40.
[https://doi.org/10.1016/S1471-4051\(01\)00004-0](https://doi.org/10.1016/S1471-4051(01)00004-0)
- Song, H. L. (1994). Automatic Vehicle Location in Cellular Communications-Systems. *Ieee Transactions on Vehicular Technology*, 43(4), 902–908.
<https://doi.org/10.1109/25.330153>
- Tomalá Robles, J., & Villa Pincay, J. (2010). *Diseño de un sistema de soporte de decisiones para resolver el problema de ruteo en un servicio de courier*.
- Vidal, T., Crainic, T. G., Gendreau, M., & Prins, C. (2014). A unified solution framework for multi-attribute vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 234(3), 658–673. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.045>
- Wickramasuriya, R., Perez, P., & Berryman, M. (2013). Adapting Geospatial Business Intelligence for Regional Infrastructure Planning, (December), 1–6.
- Zabala, C. A., & Torres, J. (2005). Implementación del Sistema de Colonia de Hormigas con Búsqueda Local al Problema de Ruteo de Vehículos con Capacidad y Ventanas de Tiempo (CVRPTW), 1–13.

Anexos

Anexo A. Encuesta cualitativa de ruteo de vehículos.

Se encuentra en la URL:

<https://docs.google.com/forms/d/1ossFhwYB1I6YeesphkDFb1DZbDDMIle4wCf39KF0fP0/viewform>

PREGUNTAS RESPUESTAS 24

Encuesta cualitativa de ruteo de vehículos.

Encuesta diseñada en el marco de una investigación de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín y la empresa Satrack.

De antemano agradecemos sus respuestas y su tiempo.

Contexto

El monitoreo de vehículos es una de las labores principales y por medio de esta investigación se desea saber cómo se hace seguimiento a la programación de las rutas de los vehículos y si los datos históricos son importantes para determinar el comportamiento que se espera de los vehículos en la ejecución de las rutas.

Tenga en cuenta que de acuerdo a los resultados se planteará una encuesta cuantitativa para analizar mejor sus opiniones como expertos.

Nota: Si es un gestor o dueño de una flota por favor responda de acuerdo a su conocimiento.
Si es un gestor o asesor de servicio, responda en la medida de lo posible según al comportamiento de las empresas que tiene a cargo.

...

Título de imagen



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA



Nombre de la empresa y/o Experto *

Texto de respuesta breve

1. ¿Utiliza alguna herramienta de la compañía o de otra fuente para definir las rutas que van a recorrer sus vehículos? ¿En caso afirmativo, cuál?

Por ejemplo, Control Trafico, Control Logístico de Tiempos o algún ruteador?

Texto de respuesta largo

2. Podría por favor describir ¿cómo hace la creación de rutas de sus vehículos?

¿Utiliza rutas previamente creadas?, ¿Se basa en la experiencia y el conocimiento de las rutas?

Texto de respuesta largo

3. ¿Cómo determina la asignación de vehículos a las rutas y cada cuanto lo hace?

Asigna un vehículo por turnos o determina ¿cual tipo de camión es mejor para enviarlo?

Texto de respuesta largo

4. Durante el monitoreo de vehículos, ¿Cuáles son las variables más importantes en el seguimiento del vehículo?

Tiempo, Distancia, Seguridad, Tamaño de la carga, paso por un puesto de control.

Texto de respuesta largo

5. ¿Existen variables importantes durante el monitoreo de vehículos que le gustaría incluir? ¿Cuales?

Texto de respuesta largo

6. ¿Cómo realiza la calificación de una ruta al terminarla?

¿Que determina que una ruta sea exitosa? Por ejemplo, si llega a su destino a tiempo, si llega completa, o si solo llega...

Texto de respuesta largo

7. ¿Es importante para usted la diferencia entre el tiempo planeado y el que de verdad empleó el vehículo? *

¿Compara los tiempos que planeó con lo que de verdad se demoró el vehículo?

- Sí
- No

8. ¿Cree que es importante tener mecanismos que le permita conocer la ejecución histórica de las rutas de sus vehículos para tener una base de comparación con las rutas programadas día a día? *

- Sí
- No

Comentarios que crea importante para esta investigación

Texto de respuesta largo

Anexo B. Encuesta cuantitativa de ruteo de vehículos.

Se encuentra en la URL:

https://docs.google.com/forms/d/1KARJlcJVynfMeIjyUPTbdQvH9SeNW443uK_ONJ1vH1s/viewform

PREGUNTAS RESPUESTAS 17

Encuesta cuantitativa de ruteo de vehículos.

Encuesta diseñada a partir de las respuestas de la encuesta cualitativa de ruteo de vehículos en el marco de una investigación de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín y la empresa Satrack.

De antemano agradecemos sus respuestas y su tiempo.

Contexto

Mediante esta encuesta se desea saber como se hace seguimiento a la programación de las rutas de los vehículos y si los datos históricos son importantes para determinar el comportamiento que se espera de los vehículos en la ejecución de las rutas.

Esta encuesta consolida opiniones de expertos para determinar la mejor forma de proceder en el seguimiento a las rutas de los vehículos.

Nota: Si es un gestor o dueño de una flota por favor responda de acuerdo a su conocimiento.
Si es un gestor o asesor de servicio, responda en la medida de lo posible según al comportamiento de las empresas que tiene a cargo.

...

Título de imagen



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA



1. ¿Cuales de los siguientes métodos utiliza para crear las rutas? *

- Información de los conductores
- Creación manual de rutas
- Creación de rutas de acuerdo a eventos de monitoreo.
- Elección de zonas con menor congestión vehicular.
- Conocimiento y experiencia.
- Sugerecias de herramientas como Google Maps u OpenStreetMap
- Otra...

⋮

2. ¿De las siguientes opciones cuales son determinantes para la asignación de rutas? *

- ⋮ Demanda y una lista de vehículos para cubrirla.
- Determinación de recursos disponibles (e.g, conductor, tamaño y tipo de la carga, horarios, entre otros).
- Turnos y cargas fijas.
- Vehículos más cercanos al origen de la ruta
- Otra...

3. ¿Cuales son las variables mas importantes para usted en el monitoreo de los vehículos en las rutas? *

- Cumplimiento del tiempo en las rutas.
- Seguridad
- Tipos de carga por rutas y vehículos
- Que la carga llegue bien al destino.
- Velocidad promedio de la ruta.
- Paradas en sitios no autorizados
- Distancia recorrida
- Consumo de combustible
- Zonas seguras y de baja accidentalidad.
- Costos operativos de transporte
- Hábitos de conducción
- Otra:...

4. ¿ Variables que Influyen en la calificación de un viaje realizado? *

- Tiempo invertido en la ejecución de la ruta
- Mercancía en buen estado
- Velocidad y comportamiento bajo en alarmas
- Novedades presentadas
- Otra...

5. ¿Es importante para usted la diferencia entre el tiempo planeado y el que de verdad empleó el vehículo? *

¿Compara los tiempos que planeó con lo que de verdad se demoró el vehículo?

- Sí
- No

6. ¿ Es importante tener mecanismos que le permita conocer la ejecución histórica de las rutas de sus vehículos para tener una base de comparación con las rutas programadas? *

- sí
- No

Anexo C: Problemas tratables y no tratables

Los problemas de optimización como es el caso de los problemas de ruteo de vehículos, se resuelven teniendo en cuenta el tiempo de ejecución de los algoritmos de lo que se han distinguido dos tipos de tiempo: Exponencial y polinomial. Y suelen ser representados con orden $O(n^k)$ con k constante.

Los problemas tratables usualmente se pueden resolver con tiempos de ejecución que incrementan lentamente cuando se aumenta el número de instancias a resolver.

Por ejemplo, resolver un problema de encontrar el número menor en una lista desordenada de datos es $O(n^1)$

Por otro lado los problemas no tratables son los que crecen en el orden $O(k^n)$ con $k > 1$. En donde los tiempos de ejecución crecen exponencialmente con el número de casos a resolver.

Por ejemplo, encontrar la combinación de una puerta digital de n números es de orden $O(10^n)$.

Tabla 7-1: Tabla de de tiempos polinomiales y exponenciales. (Rothlauf, 2007)

constant	$O(1)$
logarithmic	$O(\log n)$
linear	$O(n)$
quasilinear	$O(n \log n)$
quadratic	$O(n^2)$
polynomial (of order c)	$O(n^c), c > 1$
exponential	$O(k^n)$
factorial	$O(n!)$
super-exponential	$O(n^n)$

Para resolver el problema TSP (Problema del agente viajero) para visitar unas ciudades, se pueden tomar los siguientes casos:

“La solución más directa puede ser, intentar todas las permutaciones (combinaciones ordenadas) y ver cuál de estas es la menor (usando una Búsqueda de fuerza bruta). El

tiempo de ejecución es un factor polinómico de orden $O(n!)$, el Factorial del número de ciudades, esta solución es impracticable para dado solamente 20 ciudades. Una de las mejores aplicaciones de la Programación dinámica es el algoritmo Held–Karp que resuelve el problema en $O(n^2 2^n)$.¹⁷

La mejora de estos límites de tiempos es difícil. Por ejemplo, no ha sido determinado si existe un algoritmo para el TSP que corra en un tiempo de orden $O(1.9999^n)$.¹⁸

Otras aproximaciones incluyen:

- Varios algoritmos de ramificación y acotación, los cuáles pueden ser usados para procesar TSP que contienen entre 40 y 60 ciudades.
- Algoritmos de mejoras progresivas (iterativas) los cuales utilizan técnicas de Programación lineal. Trabajan bien para más de 200 ciudades.
- Implementaciones de ramificación y acotación y un problema específico de generación de cortes (Ramificación y poda); este es el método elegido para resolver grandes instancias. Esta aproximación retiene el record vigente, resolviendo una instancia con 85,900 ciudades. “

“Una solución exacta para 15,112 pueblos alemanes desde TSPLIB fue encontrada en 2001 usando el método de planos cortantes propuesto por (Dantzing & Ramser, 1959) basados en la programación lineal. Los cálculos fueron hechos por una red de 110 procesadores ubicados en la Universidad Rice y en la Universidad de Princeton. El tiempo total de cálculo fue equivalente a 22.6 años en un Procesador alpha de 500 MHz. En mayo de 2004, el problema del viajante de visitar todos los 24,978 poblados en Sweden fue resuelto: un recorrido de tamaño aproximado de 72,500 kilómetros fue encontrado y se probó que no existía un camino menor.¹⁹

En marzo de 2005, el problema del viajante de visitar todos los 33,810 puntos en una tabla de circuitos fue resuelto usando Concorde TSP Solver: un recorrido de 66,048,945 unidades fue encontrado y se probó que no existía un recorrido menor. El cálculo tomo aproximadamente 15.7 años – CPU. En abril de 2006, una instancia con 85,900 puntos fue resuelta usando “Concorde TSP Solver”, tomando 136 años- CPU.”(De Jaegere et al., 2014)” Texto tomado de (Applegate et al., 2007)

Lo anterior demuestra la evolución de las soluciones de comportamiento polinomial en el problema de visitar a muchas ciudades mediante procesamiento computacional y permite dimensionar el problema generar rutas eficientes en las empresas de transporte.

Anexo D. Top de las mejores empresas de monitoreo de vehículos del mundo (2016).

EMPRESA	GEO BUSINESS INTELLIGENCE	INFORMES PERSONALIZADOS	PAÍS	URL
TOMTOM TELEMATICS	No	Si	Holanda	https://business.tomtom.com/lib/doc/downloads/en_us/ttb-webfleet-reporting-brochure.pdf
TELETRAC	Si	Si	USA	http://www.teletrac.com/fleet-management-software/fleet-analytics/fleet-analytics
FLEETMATICS	No	Si	Irlanda	https://www.fleetmatics.com/enterprise/features/vehicle-reports
GEOTAB	Si	No	Canadá	https://www.geotab.com/fleet-management-software/
MANAGERPLUS	No	Si	USA	http://www.managerplus.com/
JDA	Si	Si	USA	https://www.jda.com/innovation/jda-labs
TELOGIS	No	Si	USA	http://www.telogis.com/solutions/route
FLEET MAINTENANCE PRO	No	Si	USA	http://www.mtcpro.com/fleet-maintenance.htm
GPSTRACKIT	No	No	USA	http://gpstrackit.com/
GPSINSIGHT	No	Si	USA	http://www.gpsinsight.com/solutions/features/
RTAFLEET	No	Si	USA	http://www.rtafleet.com/full-featured-list.html#2013-04-26-11-46-22
OMNITRACS	Si	Si	USA	http://www.omnitrac.com/solutions/data-analytics
GURTAM	No	Si	Bielorrusia	http://gurtam.com/
CHEVIN - FLEETWAVE	No	Si	Reino Unido	http://www.chevinfleet.com/
WEBTECH WIRELESS	No	No	Canadá	http://www.webtechwireless.com/
TRIMBLE - GEOMANAGER FLEET MANAGEMENT	No	No	USA	http://www.trimble.com/fsm/fleet_management.aspx?tab=Packages
FLEETIO	No	Si	USA	https://www.fleetio.com/all-features#
ASSETWORKS	No	Si	USA	http://www.assetworks.com/fleet/data/
AVLLVIEW	Si	No	Singapur	https://avllview.com/vehicle-tracking/fleet-usage-analysis/
RASTRAC	No	No	USA	http://www.rastrac.com/transportation